

# Horno de arco para fabricar vidrios metálicos masivos



Grado en Ingeniería en Diseño Mecánico

## Trabajo Fin de Grado

Josu Labarga Urdániz

Ricardo Ortega Hertogs

Tudela, 30 de junio de 2015

Horno de arco para fabricar vidrios metálicos masivos.



# Agradecimientos

A mi hermano, Adrián.

## Resumen

Se persigue diseñar un horno de arco para la fabricación de aleaciones metálicas vítreas masivas mediante la fusión de la aleación madre y su posterior succión a moldes cilíndricos de dimensiones de 3 a 20 mm de diámetro y de 20 a 50 mm de longitud.

El horno estará compuesto de un hogar de cobre (de muy bajo contenido en oxígeno) en el que se funden los constituyentes de la aleación alcanzando temperaturas de hasta 2500°C, mediante corriente eléctrica (alterna) de hasta 150 amperios. El sistema debe mantener una atmósfera controlada, bien vacío (al menos 10 microbar) bien atmósfera de argón puro en sobrepresión de hasta 0.5 bar.

La fusión se realizará mediante un electrodo de cobre, acabado en punta de tungsteno, que pueda girar en su habitáculo 15° respecto de la vertical y desplazarse distancias de hasta 50 mm, para alcanzar diferentes posiciones en el hogar de cobre.

Tanto el hogar como el electrodo y su recipiente deben estar refrigerados por agua, este último en circuito cerrado.

**Palabras clave:** horno de arco, vidrios metálicos masivos.

## Summary

An arc-melting furnace has been designed to produce bulk metallic glasses. The fabrication is achieved by arc-melting the mother alloy and subsequent suctioning into appropriate cylindrical copper molds. Their diameter ranges from 3 to 200 mm and their length is 50 mm. The furnace is comprised of a copper hearth onto which pieces of the material constituents, in appropriate weight ratios for a given chemical composition, are melted to produce firstly the mother alloy. Temperatures reaching up to 2500°C should be attained by arc-melting with alternating currents up to 150 amps. The system should be under controlled atmosphere: a vacuum of at least 10 mbar and high purity argon gas overpressures up to 0.5 bar.

Arc-melting is achieved by means of a copper electrode that should be able to rotate away from the vertical axis by 15° and translate axial (upwards and downwards) distances up to 50 mm, in order to reach different locations at the copper hearth. This together with the electrode should be refrigerated by running water, the latter in a closed circuit.

**Keywords:** arc-melting furnace, bulk metallic glasses

# Índice general

<b>I</b>	<b>Generalidades.</b>	<b>6</b>
<b>1.</b>	<b>Vidrios metálicos y BMGs</b>	<b>7</b>
1.1.	Distinción entre Cristales-Vidrios . . . . .	7
1.2.	Diferencias entre aleaciones amorfas y vidrios metálicos . . . . .	8
1.3.	Concepto de formación de fase vítrea . . . . .	8
1.4.	Glass-Forming Ability of Alloys (GFA) . . . . .	10
1.5.	Ratio crítico de enfriamiento (Critical Cooling Rate, $R_c$ ) . . . . .	11
1.6.	Reglas empíricas para estimar la habilidad para formar vidrio . . . . .	13
<b>II</b>	<b>Diseño del horno</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>Introducción</b>	<b>15</b>
<b>3.</b>	<b>Sistema Vacío/Gas</b>	<b>18</b>
<b>4.</b>	<b>Sistema Hidráulico</b>	<b>21</b>
4.1.	Circuito Abierto . . . . .	21
4.2.	Circuito Cerrado . . . . .	21
<b>5.</b>	<b>Sistema eléctrico</b>	<b>23</b>
<b>6.</b>	<b>Procedimiento para la fabricación de vídrios metálicos masivos</b>	<b>24</b>
<b>7.</b>	<b>Partes del horno</b>	<b>29</b>
7.1.	Partes Superior e Inferior . . . . .	29
7.2.	Electrodo . . . . .	32
7.3.	Horno Completo . . . . .	33
<b>8.</b>	<b>Aspectos críticos del diseño</b>	<b>36</b>
8.1.	Refrigeración . . . . .	36
8.1.1.	Parte inferior . . . . .	37
8.1.2.	Parte superior . . . . .	38
8.1.3.	Electrodo . . . . .	41
8.2.	Aislamiento eléctrico . . . . .	42
8.3.	Estanqueidad . . . . .	44
8.4.	Peso sistema de extracción de moldes . . . . .	47

8.5. Movilidad del electrodo . . . . .	47
8.6. Shock térmico del vidrio . . . . .	50
<b>9. Renderizados</b>	<b>53</b>

**Parte I**

**Generalidades.**



# Capítulo 1

## Vidrios metálicos y BMGs

Los materiales metálicos se consideran tradicionalmente como cristalinos en la naturaleza, o sea, con sus átomos constituyentes distribuidos de una manera regular y periódica en las tres dimensiones. En 1960 el concepto de los metales cambió cuando Pol Duwez en el Instituto de tecnología en Pasadena, California, sintetizó una aleación Au-25 at. % Si en el estado vítreo mediante solidificación rápida del líquido a ratios cercanos a millones de grados por segundo. Esta aleación Au-Si solidificada rápidamente por Duwez no mostró picos cristalinos en su patrón de difracción de rayos x (XRD). El profesor no estaba del todo convencido de la amorficidad de la muestra debido a que esta poseía una baja estabilidad termodinámica ya que pasadas 24h la aleación paso a un estado de cristalino no-equilibrio.[1]

A partir de la síntesis de esta aleación en 1960 miles de aleaciones con diferentes composiciones se han preparado como metales vítreos. Los vidrios metálicos pueden ser clasificados como tipo metal-metaloide o tipo metal-metal. En un vidrio típico metal-metaloide los átomos metálicos constituyen el 80 % y los átomos metaloides (típicamente B, C, P, y Si) el 20 %. Algunas de las aleaciones que más se han investigado en esta categoría incluyen  $Pd_{80}Si_{20}$ ,  $Pd_{77}Cu_6Si_{17}$ ,  $Fe_{80}B_{20}$ ,  $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$ ,  $Ni_{75}Si_8B_{17}$  entre otras. (Los subíndices representan el porcentaje atómico de los elementos en la aleación.)

En los vidrios metálicos tipo metal-metal solamente están involucrados átomos metálicos. Algunas de estas aleaciones que más se han investigado incluyen  $Ni_{60}Nb_{40}$ ,  $Cu_{57}Zr_{43}$ ,  $Mg_{70}Zn_{30}$ ,  $La_{80}Au_{20}$ , y  $Fe_{90}Zr_{10}$ .

### 1.1. Distinción entre Cristales-Vidrios

Hablamos de ordenamiento cristalino cuando los átomos se encuentran distribuidos de una manera periódica en las tres dimensiones con el apunte de que no es necesario que la periodicidad sea la misma en las tres direcciones, es decir, cuando existe simetría translacional de largo alcance. Por contra, cualquier sólido en el cual la disposición regular de átomos está ausente se considera de carácter “no-cristalino”. Esto es, aquellos materiales que no posean ninguna cristalinidad. “Amorfo” y “Vítreo” son los otros términos que se emplean normalmente para describir esta distribución de átomos. Parámetros como el número de coordinación (CN) que están bien determinados en los sólidos cristalinos, en los sólidos no-cristalinos es difícil determinarlos a causa de la distribución aleatoria de los átomos. En un sólido no-cristalino cada átomo posee un CN diferente.

Existen también los llamados sólidos *cuasicristalinos*, los primeros de los cuales se obtuvieron

mediante solidificación rápida, como la aleación  $Al_6Mn$ , con simetría pentagonal, con la que no pueden formarse cristales con periodicidad translacional de largo alcance.

## 1.2. Diferencias entre aleaciones amorfas y vidrios metálicos

Los términos no-cristalino, amorfo y vítreo hacen referencia a una distribución de átomos (aleatoria) similar en materiales sólidos y por tanto estos términos están siendo usados indiferentemente en la literatura dando lugar a ciertas confusiones.

Algunos investigadores prefieren utilizar el término “amorfo”, mientras otros usan “vítreo” y unos pocos “no cristalino”. Nosotros para evitar las confusiones que se puedan profucir, vamos a fijar el significado de cada uno.

Nos referiremos a “no cristalino” como un término genérico empleado para describir a cualquier sólido que no posea periodicidad translacional de largo alcance. Esto incluye materiales llamados *nanocristalinos*, en los que existen cristales de tamaño nanométrico, que no son usualmente detectables mediante difracción de rayos-X.

Un sólido no cristalino formado por un continuo enfriamiento desde el estado líquido es conocido como “vidrio”. Por otra parte, un material no cristalino obtenido por cualquier otro proceso, por ejemplo deposición en fase vapor o métodos de procesamiento del estado sólido como aleación mecánica (*mechanical alloying*), pero no directamente desde el estado líquido son referidos como “amorfos”.

Dado que el objeto principal de este proyecto es el de producir una clase de vidrios metálicos (Vidrios Metálicos Masivos, BMGs<sup>1</sup>), nosotros vamos a tratar con sólidos producidos por enfriamiento continuo desde el estado líquido. Emplearemos pues el término “vidrio” para describir a estos materiales.

Por tanto, para recapitular: Vidrio es un sólido no cristalino obtenido mediante enfriamiento continuo desde el estado líquido, y un sólido amorfo es cualquier material no cristalino obtenido mediante cualquier otro método, excepto por continuo enfriamiento desde el estado líquido.

Es importante introducir el concepto de temperatura de transición vítrea  $T_g$ . Se considera comúnmente que cuando somos capaces de detectar la  $T_g$  en un sólido podemos hablar de material vítreo. Cuando observamos en una aleación fuertes variaciones en la  $C_p$  y viscosidad con la temperatura, a esta temperatura se estará produciendo la transición vidrio→líquido y podemos designarla como la  $T_g$  de la aleación.

Es probable que por diferentes razones la  $T_g$  no se pueda detectar. Es posible que la  $T_g$  y la temperatura de cristalización,  $T_x$ , se encuentren muy cercanas, en este caso la alta influencia termodinámica de la  $T_x$  hará que la  $T_g$  sea prácticamente indetectable.

Si estas dos temperaturas están lo suficientemente bien separadas, la presencia de la  $T_g$  podrá ser fácilmente detectada. En el caso de los BMGs es típico encontrar una amplia región de líquido súperenfriado (*large supercooled liquid region*),  $\Delta T_x = T_x - T_g$ , y por consiguiente es fácil localizar  $T_g$  en estas aleaciones noveles.

## 1.3. Concepto de formación de fase vítrea

En la Fig.1.1 podemos ver la variación del volumen específico (volumen por unidad de masa) en función de la temperatura.

---

<sup>1</sup>Del inglés *Bulk Metallic Glasses*.

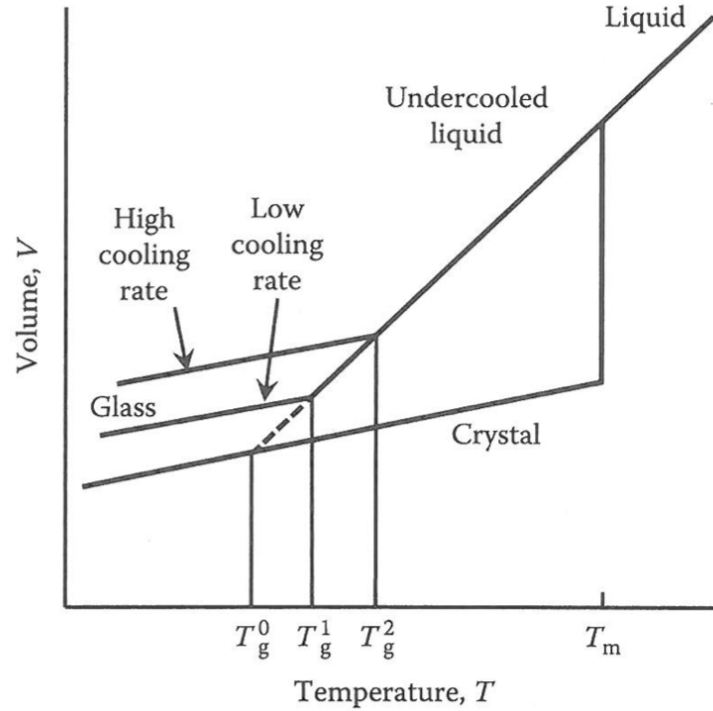


Figura 1.1: Variación del volumen específico con la temperatura para un material normal y para uno con habilidad para formar vidrio.

Cuando la temperatura de un metal en estado líquido se reduce, el volumen decrece con el descenso de la temperatura por encima del punto de fusión/punto de congelación,  $T_m$ . A la temperatura de congelación, hay una caída precipitada en el volumen específico del metal hasta que este alcanza el valor característico del sólido metálico cristalino.

Como se acaba de mencionar el volumen específico decrece de forma repentina a la temperatura de congelación para transformarse en cristalino, el líquido normalmente se subenfriará (en inglés *undercools* o *supercools*, o sea, el estado líquido puede ser mantenido sin que la cristalización tenga lugar) antes de que la cristalización comience. Esto es porque una barrera de activación de energía necesita ser superada antes de que la nucleación sólida pueda formarse en el líquido fundido, y esta barrera de activación será más pequeña cuanto más grande sea el valor del subenfriado.

Se puede predecir la formación de una fase vítrea observando grandes variaciones tanto en el calor específico como en la viscosidad al variar la temperatura. En la Fig.1.2 se pueden ver unas gráficas que muestran la variación del calor específico y de la viscosidad con la temperatura para la formación de fase cristalina o vítrea.

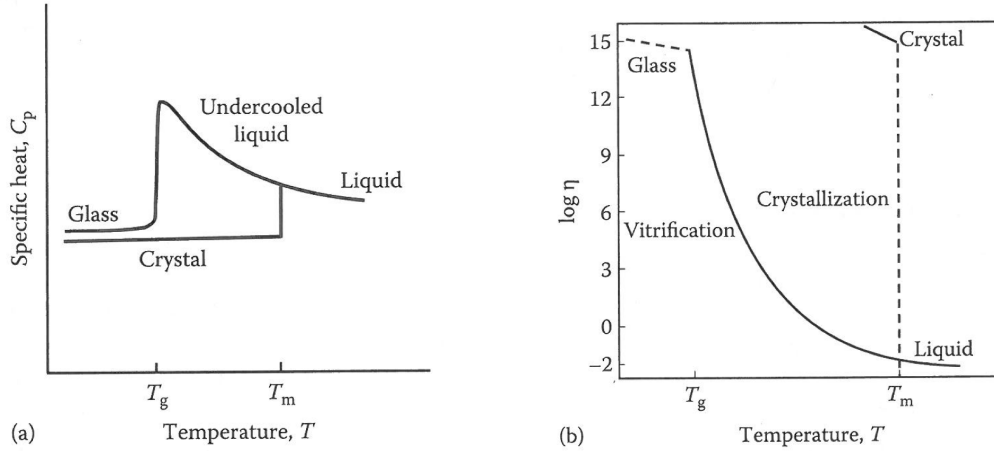


Figura 1.2: Variación del (a) calor específico y (b) viscosidad con la temperatura para la formación de fase cristalina y fase vítrea.

## 1.4. Glass-Forming Ability of Alloys (GFA)

Como ya se ha hablado antes, el metal fundido necesita ser significativamente subenfriado a una temperatura por debajo de  $T_g$ , la temperatura de transición vítrea, para ser transformado en estado vítreo.

A pesar de que no todas las aleaciones metálicas pueden ser transformadas al estado vítreo, se han logrado sintetizar un gran número de vidrios metálicos en sistemas binarios, ternarios, y de alto orden.

También se ha conseguido una estructura vítrea en unos pocos metales puros mediante técnicas de solidificación rápida (RSP) desde su estado fundido. Aunque análisis posteriores determinaron que la estabilización de la fase vítrea de metales puros es debida principalmente a la presencia de átomos de impurezas y que una concentración mínima de átomos en forma de soluto es necesaria para la formación de la fase vítrea.

Para producir vidrios metálicos de una manera razonable y fiable, y también producirlos en grandes cantidades de una manera reproducible, es esencial comprender las razones básicas para la formación de fase vítrea a partir del estado líquido.

La facilidad de una aleación metálica para transformarse en el estado vítreo se denomina en inglés *glass-forming ability* (GFA).

En este capítulo vamos a hablar de forma resumida sobre los diferentes criterios que se han desarrollado para explicar la formación de fase vítrea en sistemas metálicos, con especial referencia a las BMGs.

Primero vamos a hablar sobre el criterio que se ha desarrollado para predecir la formación de fase vítrea mediante métodos RSP, con altas velocidades de enfriamiento. Decir que la mayor parte de criterios empleados en explicar la formación de vidrios metálicos en forma de cintas por solidificación rápida (*melt-spun ribbons*) son perfectamente aplicables al caso de las BMGs. Aunque debido a las diferencias en la naturaleza de *melt-spun ribbons* y BMGs vamos a hablaremos sobre una serie de criterios específicos para BMGs.



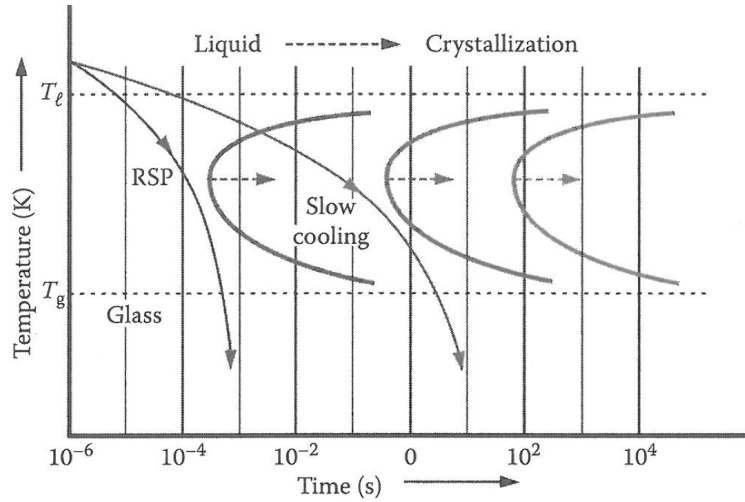


Figura 1.4: Cambio de posición de las curvas T-T-T con la adición de elementos aleantes.

Como consecuencia del incremento en el número de elementos aleantes la curva T-T-T se desplaza hacia la derecha. La curva de más a la derecha muestra una aleación típica que para conseguirla en estado vítreo es necesario enfriar por métodos RSP (*rapid solidification process*), como mediante la técnica del *Melt Spinning*. La curva situada en el centro pertenece a una aleación solidificada lentamente. Y la curva de más a la derecha pertenecería a una aleación con gran GFA ya que con ratios de enfriamiento muy reducidos logramos obtener una fase vítrea. Este último caso es el de los vidrios metálicos masivos que van a tratar de fabricarse mediante el diseño de este proyecto.

En la Fig.1.5 se pueden ver las curvas T-T-T del metal  $Ni$  puro, de la aleación  $Au_{78}Ge_{14}Si_8$ , de  $Pd_{82}Si_{18}$ , y de  $Pd_{78}Cu_6Si_{16}$ .

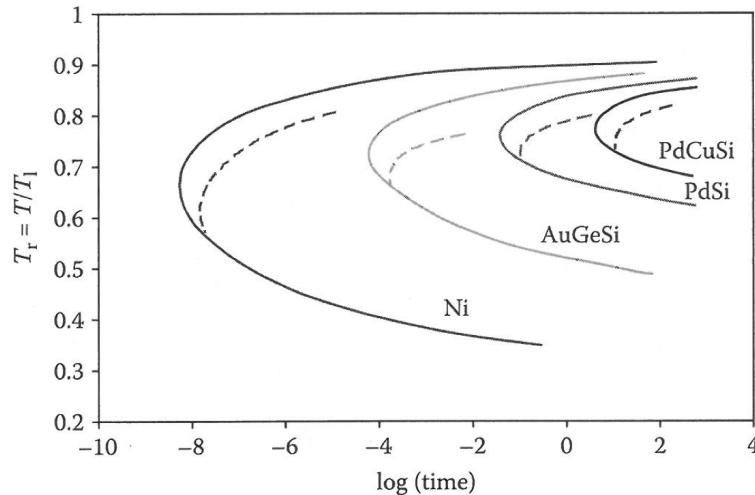


Figura 1.5: Curvas T-T-T (líneas sólidas) y sus correspondientes curvas de transformación en enfriamiento continuo.

## 1.6. Reglas empíricas para estimar la habilidad para formar vidrio

Se han formulado tres reglas empíricas [2] para estimar la habilidad de formar vidrio en una aleación metálica, éstas son:

1. La aleación debe contener al menos tres componentes. La formación de una fase vítrea es más sencilla cuanto mayor número de componentes tenga el sistema de aleación.
2. Debe existir una diferencia de tamaño atómico a lo largo de los elementos constituyentes lo suficientemente grande. Se estima que la diferencia de tamaño atómico debe ser  $>12\%$ .
3. Debe haber una entalpía de formación negativa. Cuanto mayor sea esta cantidad de energía negativa de formación mayor será la habilidad para la formación de una fase vítrea.

## Parte II

# Diseño del horno



## Capítulo 2

# Introducción

En el mercado existen diversos procesos para la fabricación de aleaciones metálicas vítreas masivas. Nuestro diseño posee características de varios de ellos. Combinando determinados aspectos de unos y otros procesos hemos logrado disponer de las funciones que creemos necesarias para lograr nuestro objetivo, fabricar aleaciones metálicas vítreas masivas.

Nuestro proyecto consiste en el diseño de un horno para la producción de aleaciones metálicas vítreas masivas mediante fusión por arco eléctrico. Este horno nos permite obtener muestras de estos materiales novedades de espesores desde 3mm hasta 20mm y longitudes de hasta 50mm. La geometría de muestras que obtengamos dependerá del tipo de molde que empleemos: cónicos, cilíndricos, etc.

Podemos diferenciar tres partes principales en el horno: una parte superior, una parte media y una parte inferior. En la Fig. 2.1 podemos apreciar estas tres partes con sus componentes mayor relevancia.

Las dimensiones máximas aproximadas de todo el conjunto son de unos 19cm de ancho por 50cm de altura por 19cm de profundidad.

La mayor parte de las piezas del horno poseen simetría radial y de revolución. Esto hace que su manufactura sea relativamente sencilla empleando las técnicas de fabricación más habituales en la industria como son torneados, fresados, taladrados, etc.

La parte superior se encuentra refrigerada por agua en un circuito abierto. Dispone de una inserción para introducir el agua y otra para extraerla. También dispone de una entrada para realizar vacío y/o introducir gas al interior del horno. La zona media de esta parte superior se ha diseñado para introducir un electrodo de cobre a través de ella, éste posee la movilidad necesaria para acceder a la denominada “zona de fusión” situada en la parte inferior. La movilidad de este electrodo la logramos gracias a un sistema de bola y anillos de teflón asentados en un hogar apropiado que los alberga.

El electrodo de cobre permite a la corriente eléctrica procedente de una fuente circular a través de él con el fin de crear un arco eléctrico entre el filamento de tungsteno situado en su parte final y el molde de cobre situado en la parte inferior. Este electrodo también se encuentra refrigerado por agua formando un circuito cerrado.

La aleación madre (aleación metálica homogeneizada previamente en un molde apropiado) se coloca encima de la parte inferior y es fundida debido a la intensidad de corriente que posee el arco eléctrico que la atraviesa. Una vez fundida, ésta puede precipitar al molde sólo por gravedad (para muestras de 30mm de espesor) o por gravedad+succión (muestras de 3mm de espesor). Nos

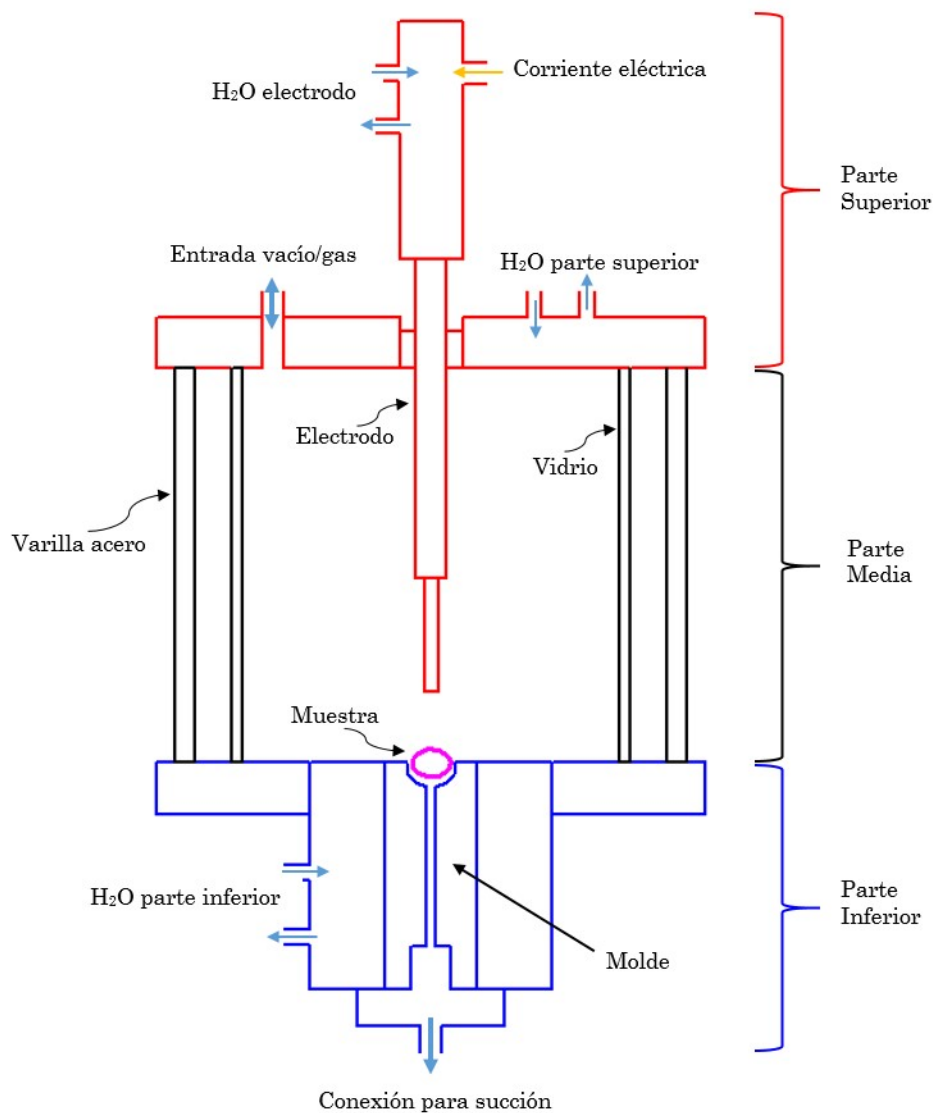


Figura 2.1: Esquema de las partes principales del horno.

ayudamos de la succión para volúmenes de muestras pequeños debido a que la fuerza de la gravedad no es suficiente como para vencer las tensiones superficiales del metal líquido.

La parte inferior también se encuentra refrigerada por agua para garantizar velocidades de enfriamiento lo suficientemente altas en los metales fundidos. Los moldes se introducen a través de la zona baja de esta parte inferior. Estos moldes son de cobre electrolítico para evitar en la medida de lo posible la aleación de impurezas presentes en el cobre con la aleación metálica fundida. El sistema de inserción de moldes posee en su parte baja la entrada para realizar vacío y así succionar las muestras al interior del molde. Este vacío se realiza mediante un circuito de medio/alto vacío.

La parte media está formada por tres varillas de acero que se encargan de mantener la solidez estructural del horno mediante la unión rígida de la parte superior con la inferior. El tubo de vidrio situado en esta parte es el encargado de dar volumen al interior del horno, éste está preparado para soportar las exigencias mecánicas y térmicas que se dan durante el proceso de fusión de muestras.

En todas las zonas del horno en las cuales pudiera haber riesgo de fugas tenemos un conjunto

sellos de fluorocarbono y teflón instalados para garantizar la estanqueidad interior. También se ha diseñado un sistema de aislamiento eléctrico de las zonas sometidas a tensión eléctrica y de conexiones a tierra en el horno para controlar el flujo de corriente en todo momento y evitar accidentes.

Recapitulando, podemos decir que nuestro horno combina tanto la técnica del arco eléctrico para fundir las muestras como la técnica de la succión para que las muestras precipiten a los moldes. También nos ofrece la posibilidad de introducir gas a través de la parte superior y crear una sobrepresión de hasta 0.5 bar. En este diseño el sistema de inserción de moldes se realiza a través de la parte inferior.

Para realizar este proyecto nos hemos apoyado en diversos focos de información. Gran parte de las ideas tienen su raíz en la Ref. [1], así como en artículos a los que éste hace referencia.

También nos hemos ayudado de webs dedicadas a la venta de hornos (Refs. [2, 3]) para fusión de materiales metálicos. De las cuales hemos obtenido información sobre hornos de fusión para materiales metálicos que se encuentran en el mercado. Alguna de la información que nos ha sido de utilidad es: materiales y dimensiones de las partes constituyentes de estos hornos, condiciones de la refrigeración de moldes y de la atmósfera interior, volúmenes de muestras que se fabrican, temperaturas que se alcanzan en el interior, suministro eléctrico necesario, etc.

También ha sido de utilidad una visita realizada al campus de Arrosadía en la UPNA, donde vimos el horno de fusión por arco eléctrico que allí emplean. De esta visita obtuvimos información sobre aspectos como: materiales de los distintos componentes del horno, circuitos exteriores de refrigeración y de suministro eléctrico/electrónico, aislamiento eléctrico del electrodo, sensores instalados para evitar posibles fallos de funcionamiento, etc.

No hay que olvidarse de la que quizá sea la fuente de información más importante de la que hemos dispuesto, que no es otra que los conocimientos y la experiencia en el campo de la física de materiales del doctor Ricardo Ortega Hertogs.

Gracias a la combinación de estas fuentes de información hemos logrado tener una buena perspectiva de cómo realizar nuestro diseño. Aparte de implementar aspectos que estaban muy bien desarrollados por otros, hemos logrado en cierto modo detectar carencias en determinadas funciones de éstos hornos y aplicar las mejoras al nuestro.

## Capítulo 3

# Sistema Vacío/Gas

En la figura que sigue podemos ver un esquema del sistema para realizar vacío e introducir gas en nuestro horno. Este sistema nos permite insertar gas en la cámara, realizar vacíos de aproximadamente  $10^{-6}$ mbar.

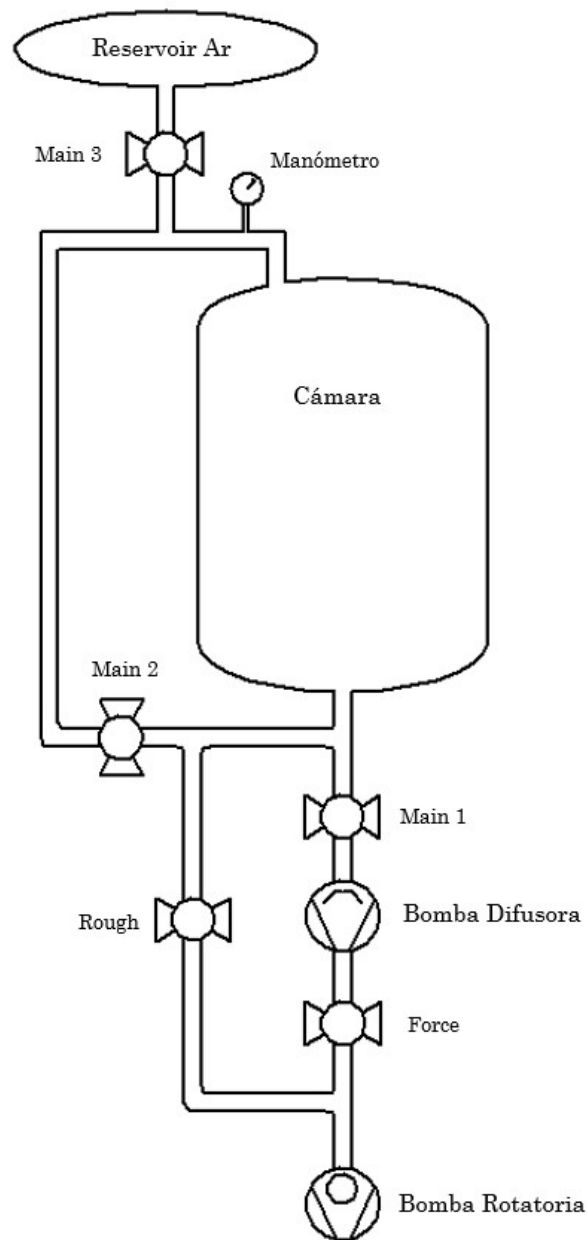


Figura 3.1: Esquema del sistema de vacío.

Para realizar vacío en la cámara seguimos los pasos que siguen:

1. Con las válvulas Rough-Main2 abiertas y las Force-Main1-Main3 cerradas activamos la bomba rotatoria. De esta forma conseguimos acondicionar la cámara alcanzando un vacío de  $\sim 10^{-3} \text{ mbar}$ , nivel de vacío que es necesario para que la bomba difusora trabaje correctamente ya que podría tener fallos por degradación de aceite.
2. Abrimos ahora la válvula Force para que la bomba difusora comience a funcionar desde un medio vacío.
3. Cerramos la Rough y abrimos la Main1 y dejamos a la bomba difusora trabajar. Lograremos vacíos de  $\sim 10^{-7} \text{ mbar}$  en la cámara.

El vacío se realiza por la parte superior y por la parte inferior aunque por esta parte no será demasiado eficaz el vaciado salvo que tengamos colocado el molde para muestras de 3mm.

En la fase de acondicionamiento de la cámara (sección 10) durante el proceso de fabricación de muestras después de estos 3 pasos deberemos realizar el siguiente:

1. Con Force-Main1-Rough-Main2 cerradas abrimos Main3 y el gas Ar del depósito se introducirá en la cámara.

Deberemos repetir estos procesos de vacío+inserción de gas repetidas veces (2 a 3 veces debería ser suficiente) hasta alcanzar un nivel de impurezas lo menor posible.

Para realizar la succión durante la fusión de muestras de espesores reducidos procederemos de la siguiente manera:

1. Únicamente con Rough abierta y Force-Main1-Main2-Main3 cerradas realizamos vacío con la bomba rotatoria para succionar las muestras fundidas al molde.

Para Ampliar información sobre los componentes y dispositivos de tecnología de vacío que aparecen en el esquema se puede consultar la Ref. [4].

## Capítulo 4

# Sistema Hidráulico

### 4.1. Circuito Abierto

El circuito hidráulico que refrigera tanto la parte superior como la inferior es el que se muestra en el esquema de la figura. El agua procede del grifo y termina en el desagüe. Este esquema tiene una variante en caso de que el caudal no fuese suficiente para refrigerar ambas zonas, para aumentar el caudal bastaría con alimentar de forma individual la parte superior y inferior.

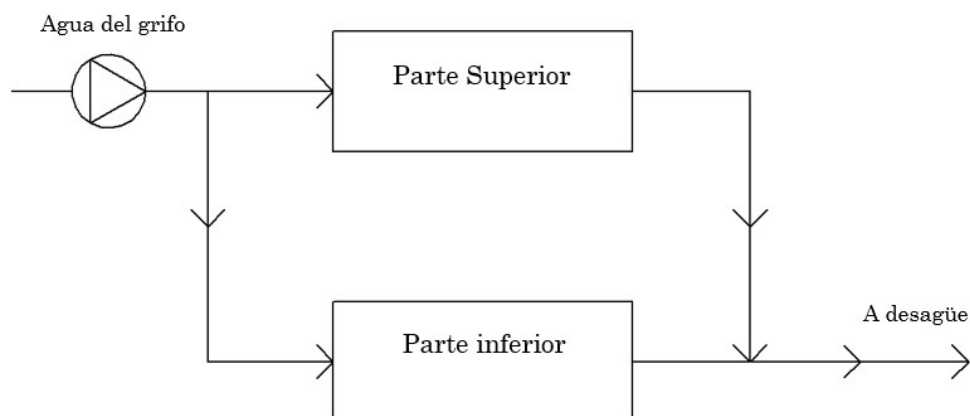


Figura 4.1: Esquema del sistema de vacío.

En la sección 12 se profundizará más en la refrigeración de estas partes.

### 4.2. Circuito Cerrado

En este esquema se muestra la refrigeración del electrodo, el cual al estar sometido a tensión eléctrica debe poseer su propio circuito de refrigeración cerrado con agua desionizada. Mediante un intercambiador de calor enfriamos el agua del circuito cerrado. El caudal de este circuito es significativamente menor al empleado en las partes superior e inferior.

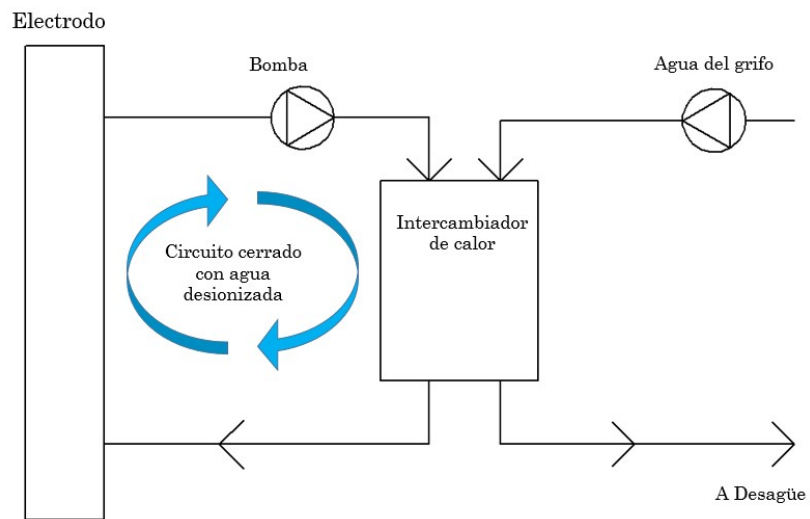


Figura 4.2: Esquema del sistema de refrigeración.



## Capítulo 5

# Sistema eléctrico

Este esquema muestra una idea aproximada del suministro eléctrico que nuestro horno necesita, lo hemos prediseñado de esta forma basándonos en las características técnicas de varios hornos comerciales.[11] Los hornos de fusión por arco eléctrico se emplean para sintetizar volúmenes de muestras dentro del rango de este diseño, por tanto su forma de abastecimiento eléctrico no debería diferir mucho de la nuestra. En estos hornos se alcanzan temperaturas de hasta 3500 grados celsius empleando potencias de entre 6 a 12 kW.

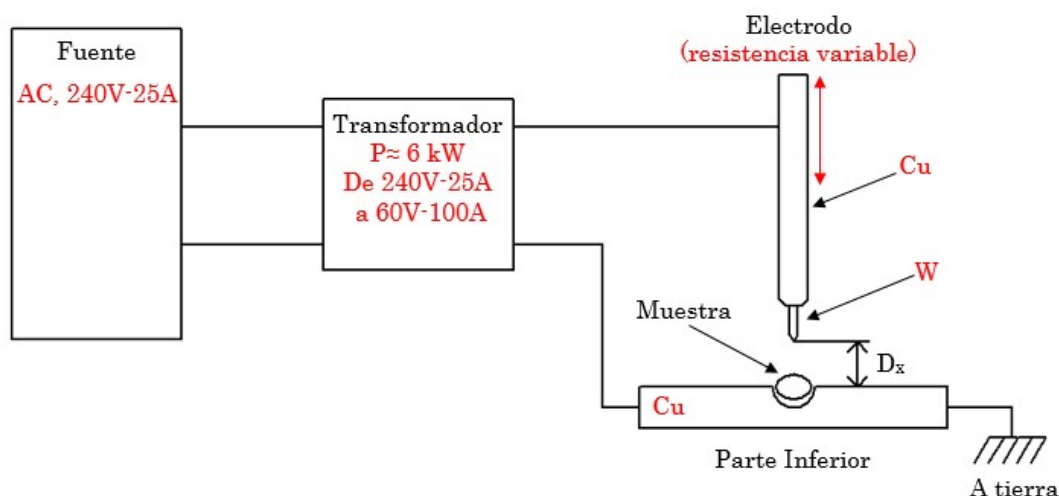


Figura 5.1: Esquema del sistema eléctrico.

En este sistema eléctrico el electrodo de cobre actúa como una resistencia variable en función de la distancia a la parte inferior  $D_x$ . Cuando para un voltaje determinado  $V$  la  $D_x$  sea lo suficientemente pequeña como para producirse la ruptura dieléctrica del gas Ar (o vacío) se creará un arco eléctrico que hará que la intensidad de corriente fluya hasta la parte inferior donde morirá en tierra.

Mencionar que el esquema no muestra un regulador de tensión/intensidad y para la fusión de muestras es necesario disponer de una regulación de ambas.

## Capítulo 6

# Procedimiento para la fabricación de vidrios metálicos masivos

Ahora vamos a ver de manera general cuales son los pasos que hay que seguir para fabricar muestras de vidrios metálicos masivos (*BMGs*) en nuestro horno. Conocer las fases por las que debemos pasar para producir muestras es importante para comprender cuales son los requerimientos que este diseño precisa.

Hemos decidido dividir el proceso para fabricar muestras en 2 etapas principales, con 3 fases dentro de cada etapa:

1. Primera etapa. Síntesis de la aleación Madre.
  - a) Fase 1. Colocación del molde apropiado para aleaciones madre.
  - b) Fase 2. Acondicionamiento de la atmósfera interior del horno.
  - c) Fase 3. Síntesis de la aleación madre mediante la fusión de *chunks* de material por arco eléctrico.
2. Segunda etapa. Síntesis de la aleación metálica vítrea masiva.
  - a) Fase 1. Colocación del Molde apropiado para metales vítreos masivos, de 3mm ó de 20mm.
  - b) Fase 2. Acondicionamiento de la atmósfera interior del horno.
  - c) Fase 3. Síntesis del metal vítreo masivo mediante fusión por arco eléctrico y su precipitación al molde (por gravedad y/o succión).

La primera etapa en la cual vamos a sintetizar la aleación Madre esta dividida en tres fases. En la Fase 1, primero acoplamos al horno el molde apropiado para producir aleaciones madre. En las inserciones situadas en la parte superior de este molde se colocan los elementos químicos constituyentes en las proporciones deseadas. El objetivo de esta etapa es lograr una muestra homogénea (aleación madre) a partir de éstos elementos químicos.

Éstos elementos químicos deben ser adquiridos por medio del distribuidor correspondiente en forma de *pellets*, *lumps* o *chunks* (tropezones de material de no más de 5mm). Si los adquirimos en forma de polvo (*powder*) se podría lograr una aleación de mayor homogeneidad que con chunks pero resultaría demasiado costoso ya que el polvo de material debe pasar por una serie de procesos

(prensado, sinterizado, etc) para estar listo para la fusión. Además, es posible que la fusión por arco no sea el método más adecuado para fundir estas pastillas de polvo prensado.

Una vez insertado el molde con los chunks podemos pasar a la Fase 2. En esta fase realizaremos la purificación de la atmósfera interior primero realizando vacío en el interior del horno a través de la entrada para vacío/gas situada en la parte superior. El proceso de vacío se realizará tal y como se ha explicado en la sección 7. En teoría si la estanqueidad del horno es buena deberíamos alcanzar vacíos del orden de  $10^{-6}$  mbar pero es de esperarse que sea menor debido a las pérdidas existentes en los conductos anteriores al horno (rendimientos de las bombas, codos, válvulas, ramificaciones en T, etc.) y también en el horno (por fugas a través de los sellos). Es por esto por lo que es importante diseñar correctamente la estanqueidad del horno sección 12.

Una vez tengamos el interior de la cámara en vacío procederemos con la introducción de gas Argón en el interior de la cámara. La inserción de gas Argón la realizaremos simplemente cerrando la Main 2 y abriendo la Main 3. Mencionar que este proceso de vaciado y posterior inserción de gas Ar se suele repetir entre 2 y 3 veces con el fin de lograr una atmósfera lo más pura posible.

Una vez finalizada la fase 2 dispondremos de una atmósfera de Ar de elevada pureza y podremos pasar la Fase 3. En esta fase vamos a fundir los chunks de material el fin de conseguir una mezcla homogénea.

Para realizar la fusión activamos la fuente de tensión regulable (60A-100A, AC) y aproximamos el electrodo al molde de manera progresiva. Cuando el electrodo este lo suficientemente cerca y se cree el arco eléctrico los chunks comenzarán a fundirse debido al incremento de la temperatura. Primero lo harán los de menor punto de fusión y conforme vayamos aumentando la intensidad de corriente lo harán los de mayor punto de fusión. El proceso de fusión es delicado ya que debemos comenzar con voltajes pequeños e ir aumentando progresivamente.

Hay que recordar que todos los moldes disponen de una inserción para colocar una cantidad de titanio en ellos. La fusión del titanio es un paso previo indispensable a otros procesos de fusión. El titanio deberá permanecer en estado líquido al mismo tiempo que realizamos otras fusiones.

En la sección 12 se discutirá brevemente la importancia de utilizar titanio fundido durante los procesos de fabricación de muestras.

En el momento en el que visualmente observemos que todos los chunks se han fundido y han formado un único volumen líquido podremos desactivar la corriente eléctrica y retirar el electrodo. Para finalizar, dejamos un tiempo para que la muestra solidifique y entonces podemos extraer el molde con nuestra aleación madre. Esta aleación madre será químicamente homogénea.

En la Fig.6.1 podemos ver los pasos más importantes de esta primera etapa:

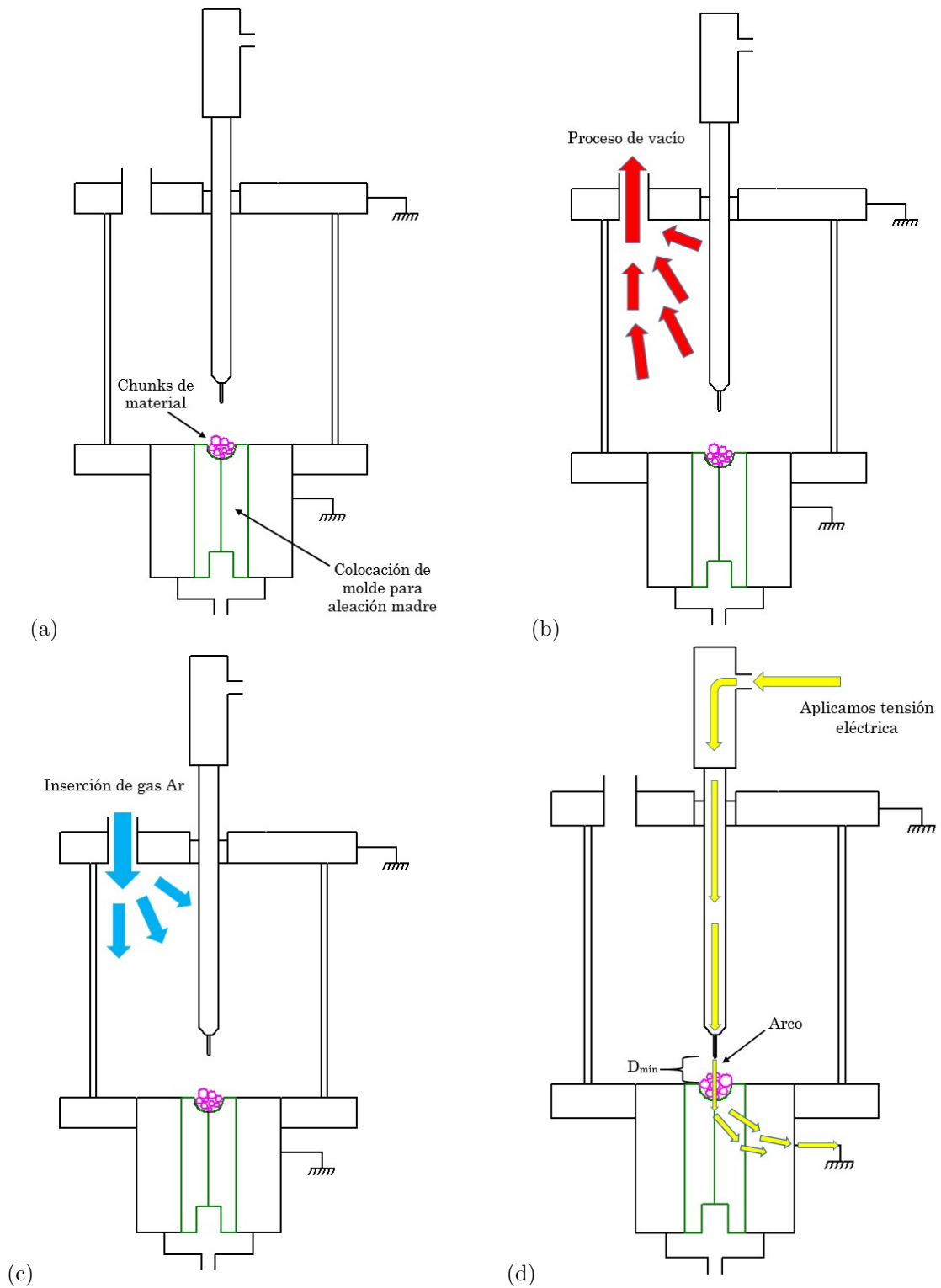


Figura 6.1: Secuencia para fabricar la aleación madre.

En la segunda etapa vamos a sintetizar el vidrio metálico masivo a partir de la aleación madre obtenida en la primera etapa. En una nueva Fase 1, procediendo de igual forma que en la primera etapa, introducimos el molde apropiado para vidrios metálicos masivos (ya sea el molde para muestras de 3mm o el de 20mm) con la aleación Madre colocada en su parte superior y el

titanio en su correspondiente inserción.

Después debemos repetir la Fase 2 del mismo modo que en la primera etapa con el fin de acondicionar la atmósfera interior.

En la Fase 3 de esta segunda etapa volvemos a conectar la fuente de tensión y fundimos el titanio, seguidamente fundimos la aleación madre hasta que esta caiga al molde por gravedad (para muestras de 20mm) o por gravedad+succión (para las de 3mm). La succión permanecerá activa al mismo tiempo que fundimos la muestra. El proceso de succión se realiza tal y como se ha explicado en sección 7. Si la combinación de la fuerza de succión y de la gravedad no fuesen suficientes para hacer caer el metal fundido al molde cabe la opción de introducir una sobrepresión de gas Argón en la cámara a través de la parte superior en el momento de la fusión.

Una vez la muestra se haya introducido por completo en el molde la dejamos reposar hasta que se solidifique por completo. El circuito de refrigeración por agua que posee la parte inferior nos garantiza una velocidad de enfriamiento superior al que tendríamos si dejásemos enfriar al aire libre.

Después extraemos el molde y obtenemos nuestra muestra final de material listo para ser sometido a las pruebas XRD y comprobar si realmente el ordenamiento interno es vítreo o no.

A continuación en la Fig. 6.2 podemos ver unas imágenes secuenciales de los pasos que se realizan en esta segunda etapa.

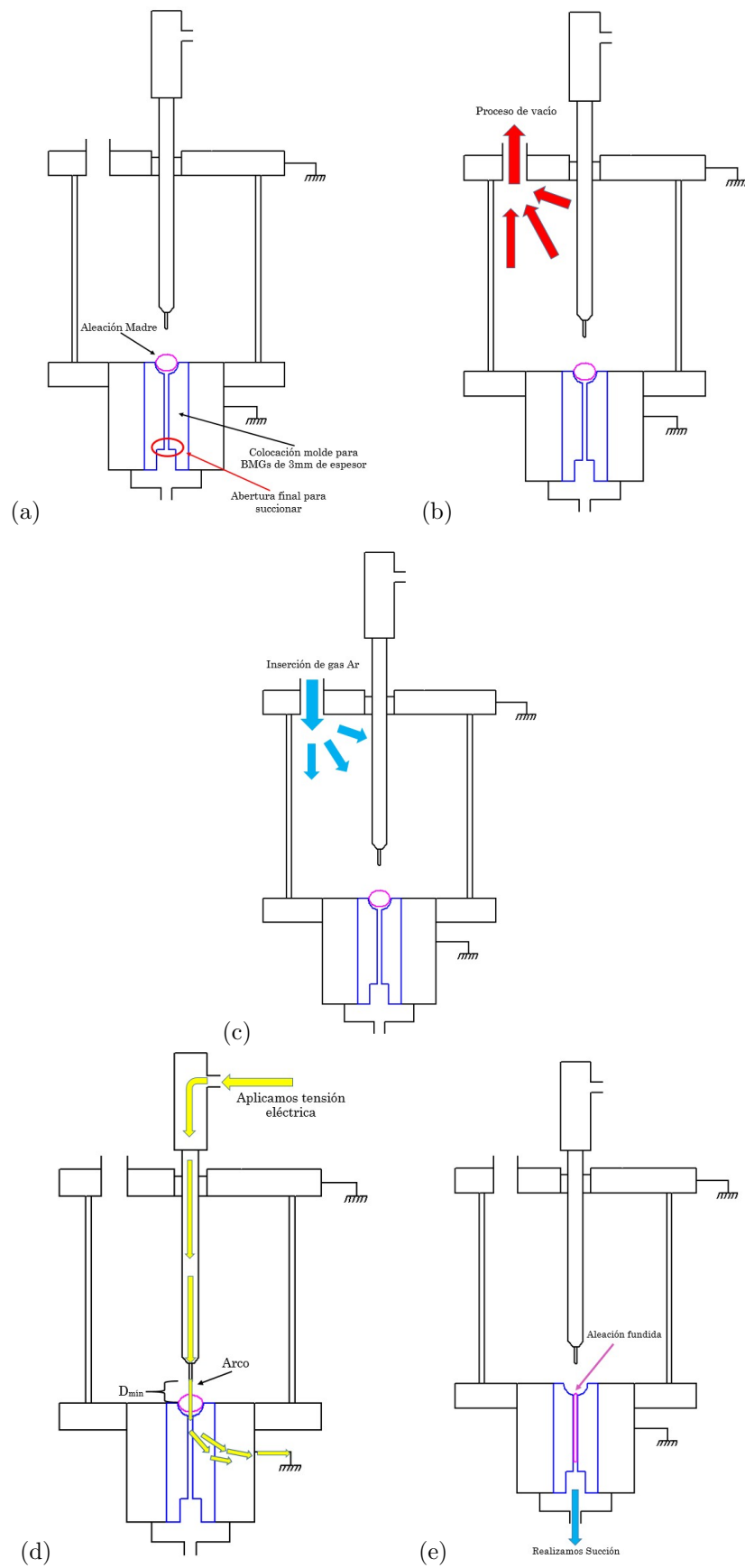


Figura 6.2: Secuencia para fabricar vidrios metálicos masivos.

## Capítulo 7

# Partes del horno

Para abordar correctamente la sección 12 dedicada a los aspectos críticos de este diseño primero es necesario conocer de manera más precisa todas y cada una de las piezas del horno que hemos diseñado.

En esta sección se discutirá sobre los materiales de los que están fabricadas estas piezas y se atribuirá un nombre a todas estas piezas ya que posteriormente se hará referencia a ellas.

Antes de comenzar es importante que el lector sepa que en el momento en el que se está escribiendo esta memoria el proyecto se encuentra en la fase de adquisición de materiales previa a la fase de manufactura. Cualquier persona que trabaje en el dominio científico/tecnológico sabe que del diseño previo a la manufactura de un proyecto hasta su resultado final ya fabricado suele haber variaciones significativas.

De esto podemos extraer que una forma de ver “lo bueno” que es un proyecto, es: un proyecto será tan bueno cuanto menos difiera el diseño pre-manufactura de su resultado final. Todo esto en un tiempo límite.

De hecho, es lógico pensar que si debemos realizar muchos rediseños al entrar en la fase de manufactura, las pérdidas de tiempo y dinero aumentarán y la eficiencia de nuestro trabajo disminuirá.

Por tanto para realizar un diseño lo más eficiente posible debemos emplear una metodología de diseño que mire continuamente a la fase de fabricación.

En este diseño hemos tratado de emplear esta metodología en la medida de lo posible pero no hay que descartar que se produzcan futuros rediseños en algunas de las piezas del horno que se explican a continuación.

### 7.1. Partes Superior e Inferior

En primer lugar decir que los nombres de todas las piezas del horno están relacionados con algún aspecto de la función que cumplen o del material del que están fabricadas.

Primero vamos a analizar de forma conjunta tanto la parte superior como la inferior. A continuación podemos ver una imagen de un corte transversal del horno (en perspectiva) en el que podemos apreciar la gran mayoría de sus piezas.

Comencemos de arriba a abajo.

A2 es una pieza de aluminio de alta importancia en el horno ya que forma el cuerpo de toda la parte superior y muchas otras piezas conectan con ella. En un principio esta pieza iba a ser

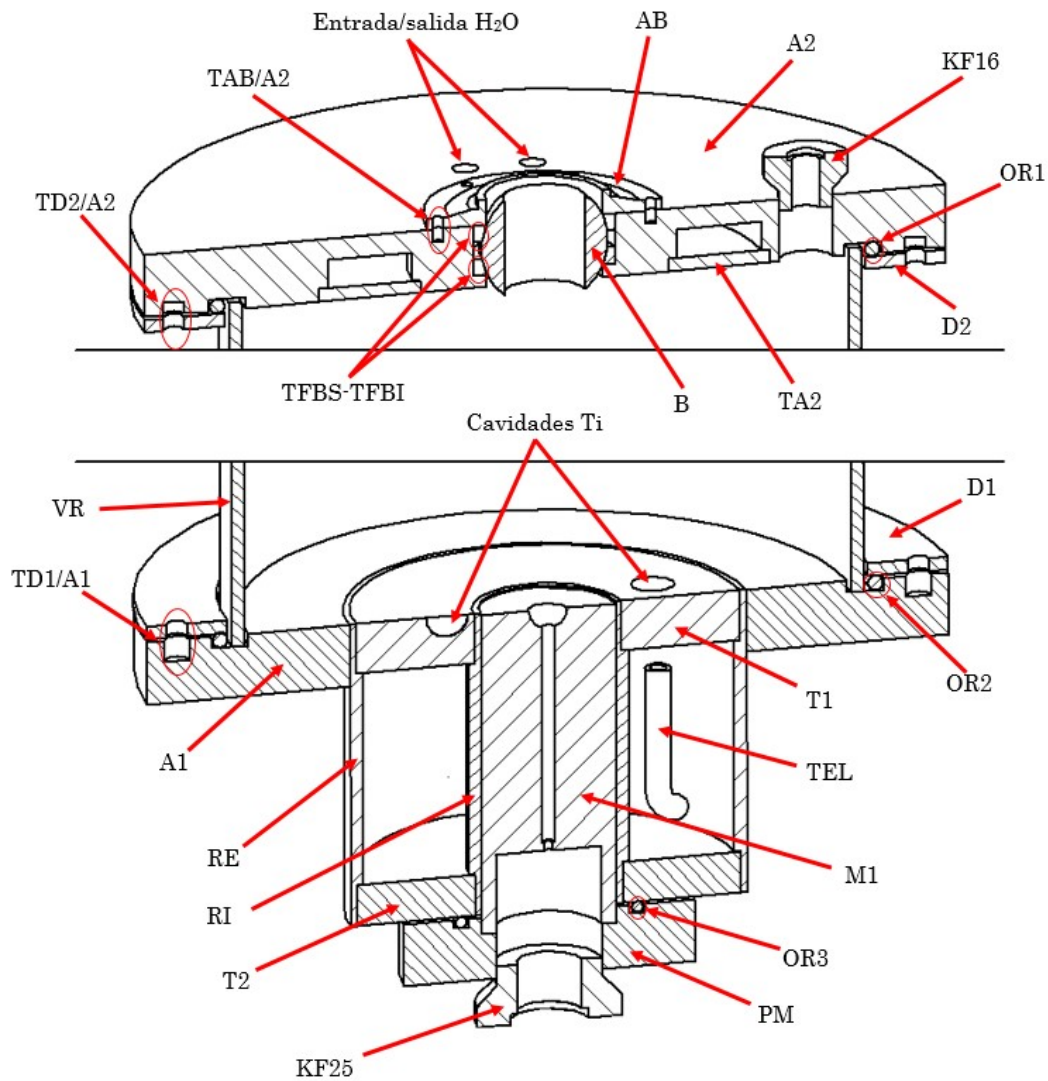


Figura 7.1: Piezas de la parte superior e inferior.

de Bronce ya que este es un material facil de mecanizar y posee una buena compatibilidad con las condiciones de servicio que van a darse en el horno durante la fabricación de muestras. Pero finalmente esta pieza será de aluminio ya que es mucho más económico reutilizar unos bloques de aluminio que no se emplearon en la realización de otro proyecto en la UPNA. Además, emplear aluminio hará que el conjunto del horno sea más ligero que si empleáramos bronce y la variación de las propiedades mecánicas de A2 al emplear un material u otro no van a ser relevantes en nuestra aplicación.

Estos bloques rectangulares son de aproximadamente  $1m * 1m * 20mm$  con lo que se prevee que no llevará demasiado tiempo ni generará demasiados costes manufacturar la geometría objetivo. Primero deberemos rebajar el espesor hasta 15mm y formar una geometría cilíndrica de 190mm de diámetro exterior. Posteriormente debemos realizar todos los mecanizados adicionales que esta pieza posee que son de fuera a adentro: 3 agujeros para las varillas de acero (V1,V2,V3), 6 agujeros para el atornillaje de D2 con A2, un mecanizado circular para la zona de sello de OR1-VR, un agujero pasante de 16mm de diámetro para realizar la conexión KF16 de vacío/gas, un vaciado de



10mm de profundidad desde la cara inferior para crear el recorrido de refrigeración en el interior de A2, otro para ajustar la TA2 que será soldada con A2 para sellar el circuito de agua, otro para insertar la TRS de separación del circuito, 2 agujeros pasantes que conecten con el circuito de refrigeración para la entrada y la salida del  $H_2O$ , 6 agujeros para el atornillaje de AB con A2 y por último un vaciado en la zona central de 12mm desde la cara superior junto con un agujero centrado pasante en este vaciado para crear tanto el hogar de B-TFBS-TFBI como para posibilitar la inserción del electrodo.

En resumen, se deberán realizar cerca de 24 operaciones en A2 a partir de la geometría cilíndrica de 15mm x 190mm de las que la gran mayoría son torneados y taladrados. Aunque hay que decir que se deberán realizar operaciones adicionales como los roscados de varios agujeros, M6 para los agujeros de V1,V2,V3 y los 6 atornillajes de D2 con A2, y M3 para el atornillaje de AB con A2. Otra operación adicional de alta importancia en A2 son los pulidos de las paredes del vaciado central de 10mm y el del mecanizado de la zona para el sello OR1-VR. Sin un buen pulido de estas zonas podrían producirse fugas a través de los sellos de fluorocarbono (OR1) y de teflón (TFBS-TFBI) y el aspecto de la estanqueidad en este proyecto es crítico y se discutirá con más detenimiento en la sección 12.

Tanto TRS como TA2 son también piezas de aluminio, las cuales soldadas en A2 delimitan el canal de refrigeración de esta parte superior. Estas piezas pueden ser extraídas y manufacturadas a partir del material que reste del bloque de aluminio base. En la sección 12 se hablará con más detalle sobre la función que cumplen estas piezas en la refrigeración superior.

La bola (B) que permite la movilidad del electrodo es una pieza de precisión y tanto su superficie esférica como la superficie del agujero interior deben estar lo más pulidos posibles. Esto es necesario para garantizar el sello con piezas de teflón TF1, TFBS y TFBI, entre B. Además de para el sello, el contacto íntimo es necesario para que el rozamiento sea lo menor posible y la movilidad entre estas piezas sea adecuada. La movilidad de esta zona se discutirá en la sección 12. Esta bola de 30mm de diámetro exterior se ha comprado maciza en acero AISI 304, este acero es apto para mecanizados y además posee alta resistencia a la corrosión. Este material es el apropiado puesto que a B hay que realizarle un agujero pasante centrado de 19mm y además nos interesa que esta pieza no sufra corrosión.

TFBS y TFBI son anillos de teflón (mirar geometría en los planos) sobre los cuales la bola (B) gira y sella. La fabricación de estos anillos es posterior a la adquisición de la bola ya que la curvatura interior de éstos debe coincidir con la curvatura exterior B.

La función de la pieza AB es doble, por una parte sirve para presionar a TFBS para asegurar el sello y por otra parte sirve como apoyo para el muelle (MUE) así como para permitirle cambios de posición con respecto a Z. La presión sobre TFBS se ejerce gracias a los 6 atornillajes de AB con A2. Por su parte MUE apoya libremente sobre AB y puede desplazarse a través de ella cuando B rota. Esta libertad de movimiento del MUE se consigue gracias a que AB posee una caída en pendiente de un ángulo igual al de la movilidad máxima  $\theta_{máx}$ , que es de  $17^\circ$ .

Tanto D2 como D1 son piezas de chapa de acero pensadas para ejercer presión sobre OR1 y OR2 respectivamente. Gracias a esta presión, los O-Rings de fluorocarbono se expanden y sellan con VR. Esta presión la conseguimos gracias a los 6 atornillajes que unen D2 con A2 y D1 con A1. Además estas chapas poseen tres aperturas para que las tres varillas de acero (V1, V2 y V3) puedan abrirse paso desde A2 hasta A1.

Las varillas V1, V2 y V3 son las encargadas de unir A1 con A2 y han sido diseñadas para que éstas soporten toda la carga que se pueda ejercer en esta parte superior. La carga que soportarán

estas varillas será la carga fija perteneciente al peso propio de toda la estructura superior (incluido el electrodo) más la carga variable debida al manejo del electrodo (carga ejercida a AB a través de MUE) por parte de la persona que funde muestras. Para realizar el cálculo del diámetro mínimo que debían tener estas varillas para trabajar en régimen elástico suponiendo un acero AISI 304, se supuso una carga neta sobre la parte superior de 35kg (superior en más de un 200 % al peso de parte superior actual más el del electrodo en reposo). A través de estos cálculos se determinó que un diámetro de 6mm era de sobras suficiente para nuestra aplicación.

El vidrio VR se encuentra apoyado libremente sobre A1 y no hace contacto con A2. Entre A2 y VR se ha dejado una distancia de seguridad de 1mm para evitar fallos mecánicos por dilataciones térmicas en VR. Aunque estas dilataciones van a ser bajas ya que VR es un vidrio del tipo boro-silicato con baja expansión térmica. VR sella por la parte inferior gracias la deformación de OR2 y en la superior gracias a OR1. En la sección 12 se ampliará la información referente a VR.

Tanto KF16 como KF25 son conexiones aptas para ser soldadas a A2 y a PM respectivamente. Ambas son de bronce por su facilidad para la soldadura. Estas conexiones son las más adecuadas para, a partir de ellas, diseñar el sistema de vacío apropiado con los dispositivos y conexiones empleadas en tecnología de vacío. Consultar REFERENCIA A <http://www.lesker.com/newweb/index.cfm> para ampliar información sobre tecnología de vacío.

En la parte inferior la pieza encargada de conectar con la parte superior es A1. A1 es una pieza también de aluminio extraído a partir del bloque base del que disponemos. Esta pieza posee exactamente el mismo mecanizado para albergar a VR y a OR2 que el que posee A1 para VR y OR1, además de los agujeros necesarios para la inserción tanto de V1-V2-V3 como de los 6 atornillajes para unir D1 con A1.

A esta pieza de aluminio A1 se encuentra soldada RE. RE es un tubo de cobre tipo electrolítico que junto con T1, T2 y RI delimitan el conducto de refrigeración de la parte inferior del que se hablará en la sección 12. La soldadura de Aluminio-Cobre de A1-RE no es la más común pero se ha comprobado que con un sustrato adecuado es realizable. Mencionar que al estar RE y A1 en contacto es posible que se produzca corrosión electroquímica entre ambas en presencia de un electrolito como puede ser un alto nivel de humedad en el recinto donde se encuentre el horno. El riesgo de corrosión es alto debido a la gran diferencia entre los potenciales del aluminio y del cobre. Para ampliar información sobre este tipo de corrosión consultar la Ref. [5].

Por tanto RE-RI-T1-T2 se encuentran unidos mediante soldaduras cobre-cobre entre ellos delimitando el volumen de refrigeración.

## 7.2. Electrodo

En la Fig.7.2 podemos ver las piezas que forman el electrodo con sus respectivos nombres.

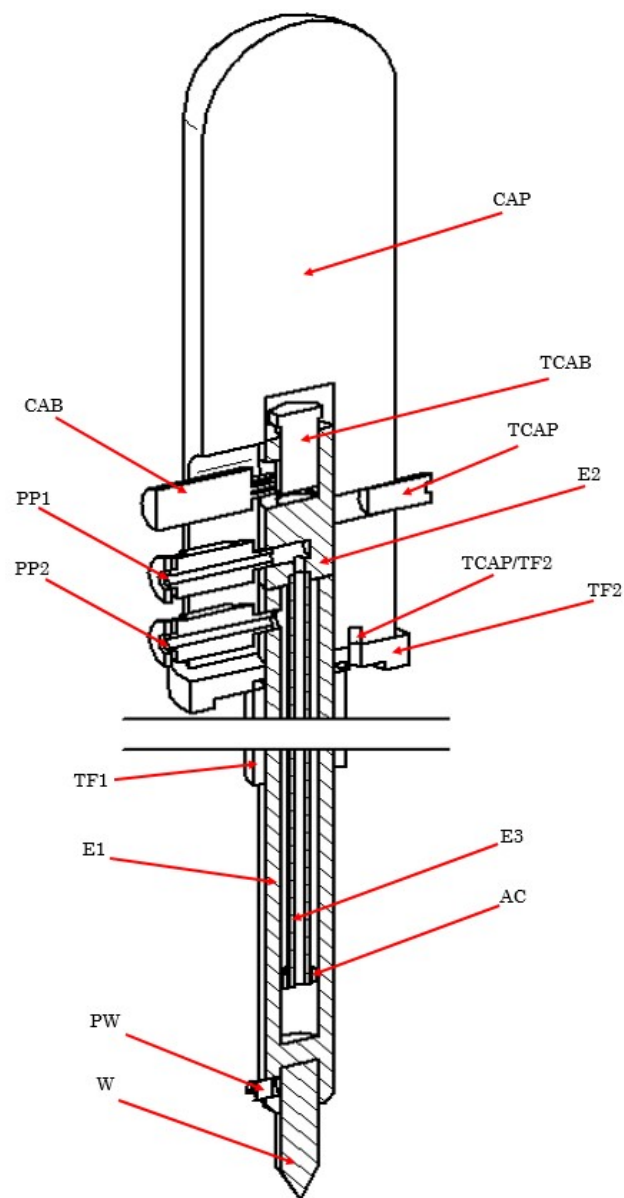


Figura 7.2: Piezas del electrodo.

### 7.3. Horno Completo

En la Fig.7.3 podemos ver las piezas restantes del horno completo.

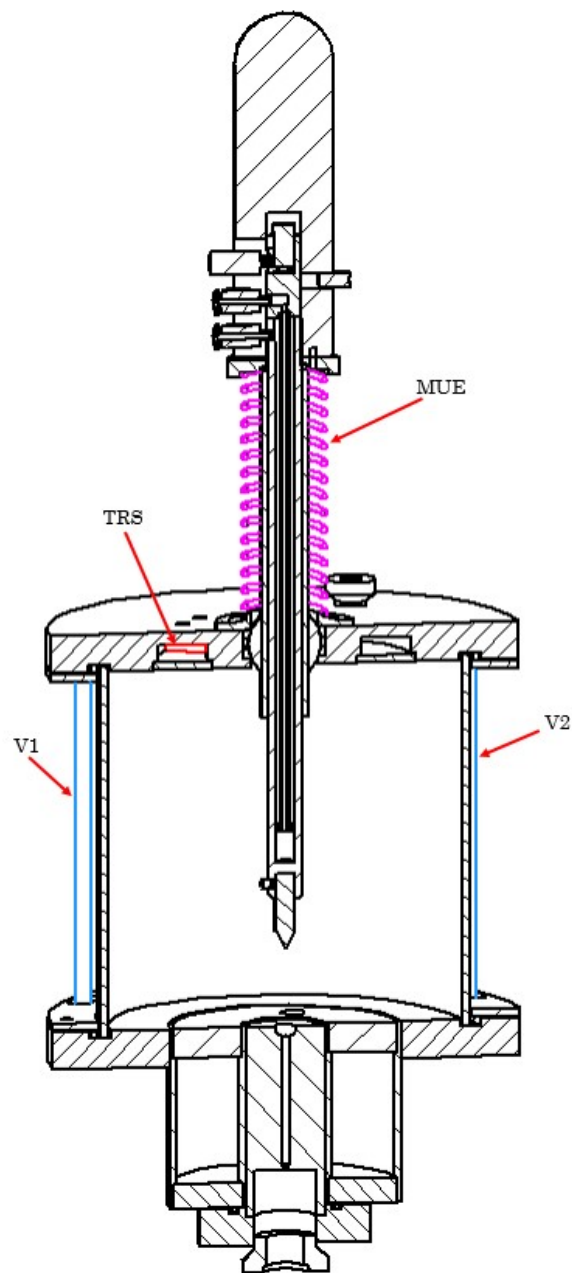


Figura 7.3: Partes del horno completo.

En la Fig. 7.4 se puede ver una vista en alzado de uno de los cortes más representativos del diseño.

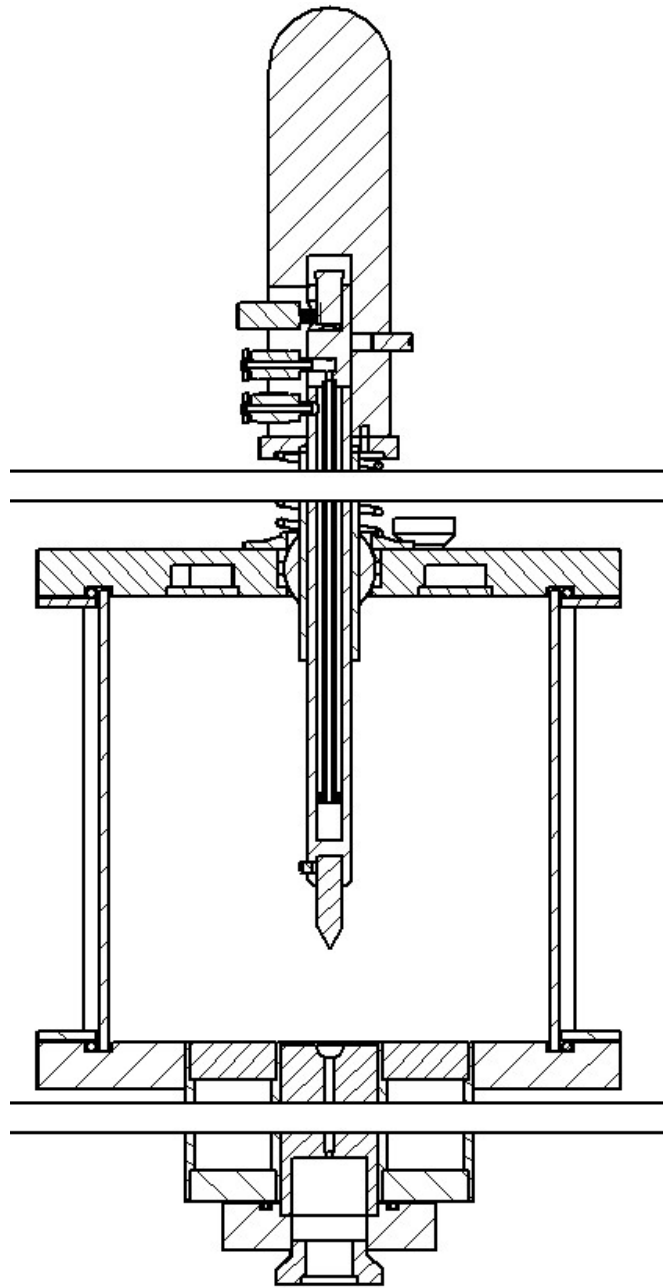


Figura 7.4: Alzado de corte del horno completo.

## Capítulo 8

# Aspectos críticos del diseño

Ya tenemos una idea global de las funciones que cumple el sistema que hemos diseñado, de las fases por las que debemos pasar para fabricar muestras y hemos visto todas las partes del horno. Ahora es turno de hablar sobre los aspectos críticos que encontramos en nuestro horno.

Son críticos porque todo el diseño del horno depende de ellos en mayor o menor medida. Estos son los factores más importantes para lograr el objetivo que persigue este proyecto, producir aleaciones metálicas vítreas masivas.

La refrigeración de la parte inferior es uno de estos aspectos críticos puesto que, como hemos visto en el libro de Inoue, para producir muestras de vidrios metálicos masivos es imprescindible solidificar la aleación a una velocidad por encima de la velocidad crítica  $R_c$  propia de cada aleación. Tanto la refrigeración de la parte inferior como la de la parte superior y la del electrodo también son necesarias para evitar fallos mecánicos en el horno debido a la energía irradiada por las muestras fundidas en su interior.

La estanquiedad del horno para evitar fugas de gas también es un aspecto muy a tener en cuenta ya que la fusión de muestras debe realizarse necesariamente en una atmósfera controlada.

También hay que asegurar el control del circuito eléctrico que se forma en el horno durante el proceso de fusión. Por ejemplo, en caso de no tener un buen aislamiento con materiales dieléctricos en las zonas susceptibles a la manipulación humana como la zona de agarre del electrodo, se podrían producir consecuencias dañinas tanto en la salud de las personas que manipulen el horno como en su entorno físico.

Para reducir lo máximo posible la fatiga física de una persona que va a trabajar produciendo un gran número de muestras, es necesaria una zona de extracción de moldes lo más liviana posible.

Muchas de las dimensiones del horno han sido diseñadas en función de la movilidad necesaria para el electrodo, por tanto también consideramos este factor como crítico.

Decir que todos estos aspectos se encuentran interconectados unos con otros y que hay que realizar el diseño de tal manera que se cumplan y se combinen de adecuada y equilibradamente todos ellos.

A continuación vamos a discutir con mayor profundidad todos estos aspectos clave.

### 8.1. Refrigeración

En esta sección vamos a discutir el “como” y el “por qué” se encuentran refrigeradas cada una de las tres principales zonas en este diseño: la parte inferior, la parte superior y el electrodo.

Primero se hablará sobre los motivos por los que es necesaria la refrigeración de estas partes y posteriormente se verá cómo se han diseñado.

En este diseño es importante garantizar una buena evacuación del calor producido durante el proceso de síntesis de muestras. Como ya se ha comentado, en el momento de relizar la fusión, la corriente eléctrica procedente de la fuente circulará a través del electrodo de cobre hasta llegar a la punta de tungsteno. En el momento en el cual la distancia entre ésta y la parte inferior de cobre (conectada a tierra) sea lo suficientemente pequeña como para que se produzca la ruptura dieléctrica de la atmósfera interior (Argón), se creará un arco eléctrico que circulará por la muestra calentandola por efecto Joule hasta fundirla. De igual manera sucederá con la muestra de Titanio previamente fundida con el fin de absorber impurezas en beneficio de la aleación metálica.

En el momento en que tengamos tanto la aleación metálica como el Titanio fundidos, éstos estarán emitiendo una gran cantidad de calor por radiación y conducción a los elementos de su alrededor (Vidrio, molde, parte superior etc). Decimos pues que éstos son los dos focos principales de calor en el horno en el momento de la fusión.

Mencionar también la posibilidad de que se produzcan recalentamientos por efecto Joule en el electrodo de cobre y en la parte inferior de cobre (conectada a tierra), aunque estos recalentamientos son practicamente despreciables en comparación con los que pueden producir las muestras fundidas.

Por tanto decinmos que la refrigeración en el horno es necesaria por dos motivos principales:

1. Para evitar el fallo mecánico de las piezas que reciben energía por radiación y/o conducción de las muestras fundidas.
2. Para solidificar las muestras de aleaciones metálicas desde el estado líquido lo más rápidamente posible y así obtener una fase vítrea homogénea.

La refrigeración por agua es la mejor opción de refrigeración ya que es de fácil alcance, de bajo coste y con una capacidad de refrigeración bastante superior a la de otros medios como por ejemplo el aire.

Cada una de las tres zonas de refrigeración tiene su propio circuito de refrigeración aunque también cabe la posibilidad de que el circuito de la parte superior y el de la parte inferior puedan estar formando un único circuito ya que ambas partes emplean agua del grifo en circuito abierto. Estas dos partes se encuentran alimentadas por agua corriente (del grifo) ya que estas zonas están conectadas a tierra.

El circuito de refrigeración del electrodo debe tener su propio circuito cerrado de agua ya que ésta es una zona sometida a tensión electrica. Además, este circuito deberá emplear agua desionizada para que ésta tenga la menor conductividad eléctrica posible y también para evitar problemas de obstrucciones de los conductos a causa de la deposición de compuestos resultantes de la reacción de las sales del agua con las paredes de cobre.

A continuación vamos a ver con detenimiento cada una de las tres zonas de refrigeración.

### **8.1.1. Parte inferior**

La misión principal de la refrigeración de la parte inferior es la de alcanzar un ratio de enfriamiento de la aleación metálica fundida lo suficientemente grande como para garantizar la formación de una fase vítrea homogénea. En caso de no diseñar una buena refrigeración de esta parte, sería imposible alcanzar el ratio de enfriamiento necesario para fabricar gran parte de los vidrios metálicos masivos y por tanto no alcanzaríamos el principal objetivo de este proyecto.

Como ya se ha explicado anteriormente, para la obtención de vidrios metálicos masivos se debe pasar por dos procesos de fusión. Un primer proceso para pre-alejar los elementos constituyentes en forma de *chunks* y un segundo proceso para obtener el vidrio metálico masivo a partir de la aleación madre.

En este segundo proceso de fusión la muestra fundida debe caer por gravedad y/o succión al interior del molde deseado. Una vez hay precipitado completamente, la muestra debe ser enfriada lo suficientemente rápido como para que se forme una fase vítrea homogénea. Esto lo conseguimos gracias al circuito de refrigeración presente en esta parte inferior, la zona delimitada por T1-T2-RI-RE. Un determinado caudal de agua es introducido a través de un tubo de cobre (TEL) en la zona delimitada por T1-T2-RI-RE, este tubo fuerza al agua a subir a lo más alto del circuito de refrigeración para luego recorrer toda su sección y finalmente salir del circuito por la abertura situada en la parte inferior del recorrido. Con esta colocación tanto del tubo de entrada como del agujero de salida del agua, garantizamos el continuo movimiento del agua desde la región superior del circuito (zona más sensible a recalentamientos) hasta la inferior. De no forzar este movimiento del agua quedarían zonas de agua estancada y esto no nos interesa ya que se disminuiría considerablemente la capacidad de refrigeración.

El agua está en contacto íntimo con el cobre de esta parte inferior, la cual a su vez lo está con los moldes de cobre electrolítico. Recordemos que el cobre es un excelente conductor térmico. Para maximizar la capacidad de refrigeración el espesor de RI debe ser lo menor posible, siendo 3mm el espesor mínimo para evitar fallos mecánicos de los componentes. También hay que garantizar que el contacto entre los moldes (M1, M2, MM) y RI sea el máximo posible. De esta forma nos aseguramos una extracción de calor eficaz de las muestras fundidas.

En caso de que el enfriamiento de los moldes no fuese suficiente para alcanzar nuestros objetivos cabría la posibilidad de aumentar el caudal de refrigeración mediante el incremento de la velocidad del flujo. Así lograríamos un ratio de enfriamiento de muestras mayor.

Mencionar que no es un problema fácil el de determinar el ratio de enfriamiento  $R_c$  que conseguiremos con un determinado caudal  $Q$  recorriendo nuestro volumen de refrigeración  $V_{ref}$ . Mediante nuestra experiencia e intuición hemos determinado unas dimensiones aproximadas del circuito de refrigeración ( $\sim 25 \times 50 \text{ mm}$ ) las cuales creemos que serán suficientes.

En la Fig. 8.1 que sigue se puede ver el recorrido del agua en esta parte inferior desde su entrada hasta su salida.

Es cierto que el agua del grifo, al estar en contacto con el cobre puede dar lugar a la formación de óxidos, pero este hecho aquí no es relevante ya que no va a afectar a la muestra de material fundido en ningún momento. Además, si este fuese un problema grave, causando obstrucciones en la entrada y salida se podría apostar por utilizar agua desionizada al igual que en el circuito cerrado del electrodo.

### 8.1.2. Parte superior

Otra parte refrigerada es la superior. Quizá sea la parte menos importante de refrigerar pero ya que era posible incorporar un pequeño circuito sin entorpecer otras funciones de esta parte como la inserción para gas/vacío o la zona de movilidad electrodo, hemos preferido refrigerarla para salvar eventuales problemas.

Se ha diseñado un circuito de refrigeración en A2 para evitar posibles recalentamientos debidos a la radiación de las muestras fundidas del interior de la cámara. Refrigerando esta parte también



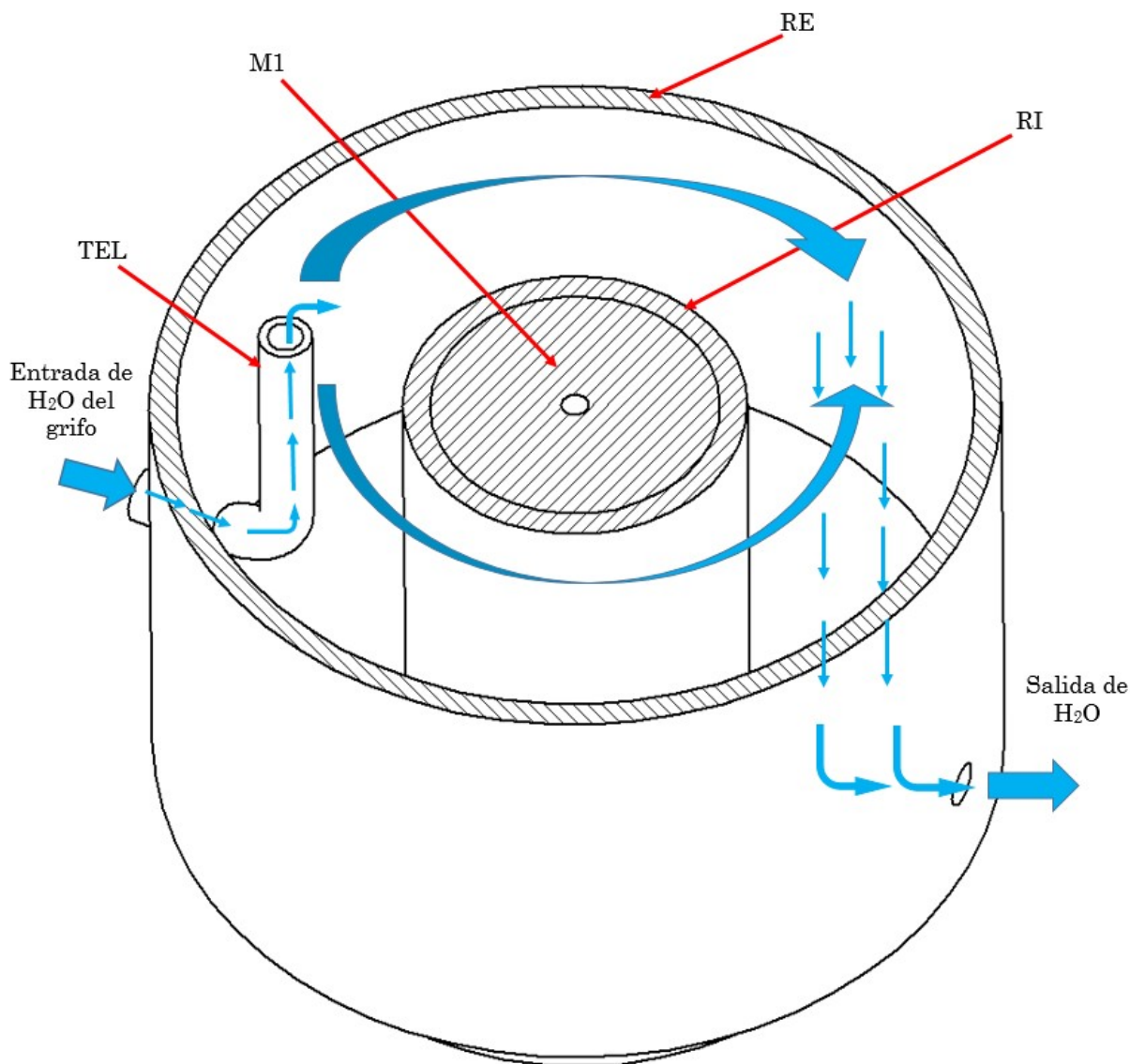


Figura 8.1: Recorrido del agua en la refrigeración inferior.

conseguimos evitar recalentamientos y fallos mecánicos en la zona de movilidad del electrodo (B, TFBS, TFBI, AB) la cual es una zona de alta precisión y un fallo en ésta supondría un alto coste de reparación.

El agua proveniente del grifo circula por un tubo de polipropileno hasta llegar a la entrada de H<sub>2</sub>O situada en la cara superior de A2. Mediante una conexión similar a las PP1 y PP2 el agua pasa del tubo de plástico a el circuito de refrigeración en A2. Este circuito se encuentra delimitado por el mecanizado de A2, por TA2 y por TRS. En A2 a través de un tubo de cobre por la parte superior, el agua es forzada a recorrer el volumen de refrigeración para después se extraída también mediante un tubo de cobre por la parte superior de A2. Estos tubos de cobre están soldados a la pieza A2 de aluminio para evitar fugas. Estos tubos de cobre conectan con otros tubos de Polipropileno (mas económico y cómodo) en los exteriores del circuito. En caso de ser necesaria mayor capacidad de refrigeración simplemente bastaría con aumentar el caudal Q.

En la Fig.8.2se puede apreciar el recorrido del agua en el interior de la parte superior desde su

entrada hasta su salida a desagüe.

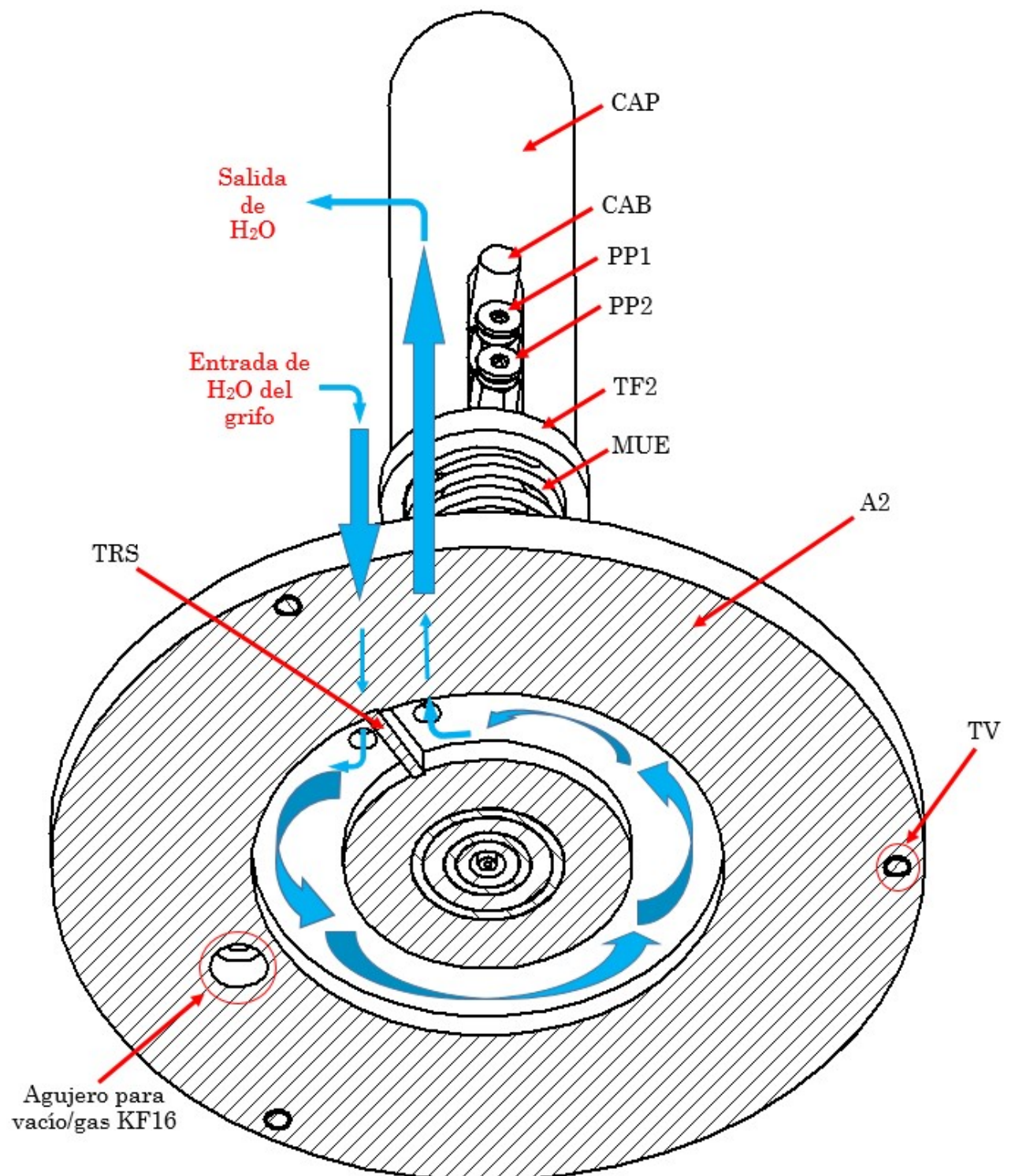


Figura 8.2: Recorrido del agua en la refrigeración superior.

### 8.1.3. Electrodo

El electrodo es un elemento muy sensible a sufrir fallos mecánicos ya que es una pieza de precisión en su fabricación.

Posee uniones por soldadura cobre-cobre en su diseño (E1-E2, E3-E2, ...), las cuales en caso de no estar correctamente refrigeradas podrían debilitarse mecánicamente e incluso fallar debido al incremento de temperatura provocado por la energía irradiada de las muestras fundidas (aleación y Titanio) y también por causa del recalentamiento por efecto Joule a través del cobre.

Además de las soldaduras, existen piezas de Teflon en íntimo contacto con el cobre del electrodo (CAPERUZA+TEF2+TEF1 con E1+E2), el cual de no estar refrigerado podría recalentar al polímero y producir su fallo mecánico. Además de esto, la porción de Teflón TEF1 que se encuentre en el interior de la cámara durante el proceso de fusión se verá fuertemente afectada por la radiación emitida en el interior de la cámara. La unión de TEF1-TEF2 realizada mediante adhesivo también podría fallar en caso de producirse un recalentamiento en esa zona. Es por todo esto por lo que es indispensable que el electrodo tenga su propio circuito de refrigeración.

Al igual que en los circuitos de refrigeración de las partes inferior y superior el agua es forzada a recorrer un determinado  $V_{ref}$  con un caudal  $Q$  variable. Es importante que esta refrigeración recorra la mayor porción de electrodo posible así tendremos la mayor parte del electrodo en optimas condiciones de trabajo.

El electrodo es una pieza sometida a tensión eléctrica por lo que debe tener un circuito cerrado de refrigeración. El agua deberá ser agua desionizada debido a que hay que evitar al máximo la formación de óxido no deseados ya que éstos podrían obstruir el circuito por su acumulación.

El volumen de refrigeración se ha pensado para ser el máximo permitido por las dimensiones de E1 (14mm Ø), sin dejar paredes excesivamente delgadas que pudieran producir fallos en el material. En la Fig.8.3 se puede ver con detalle como es esta refrigeración.

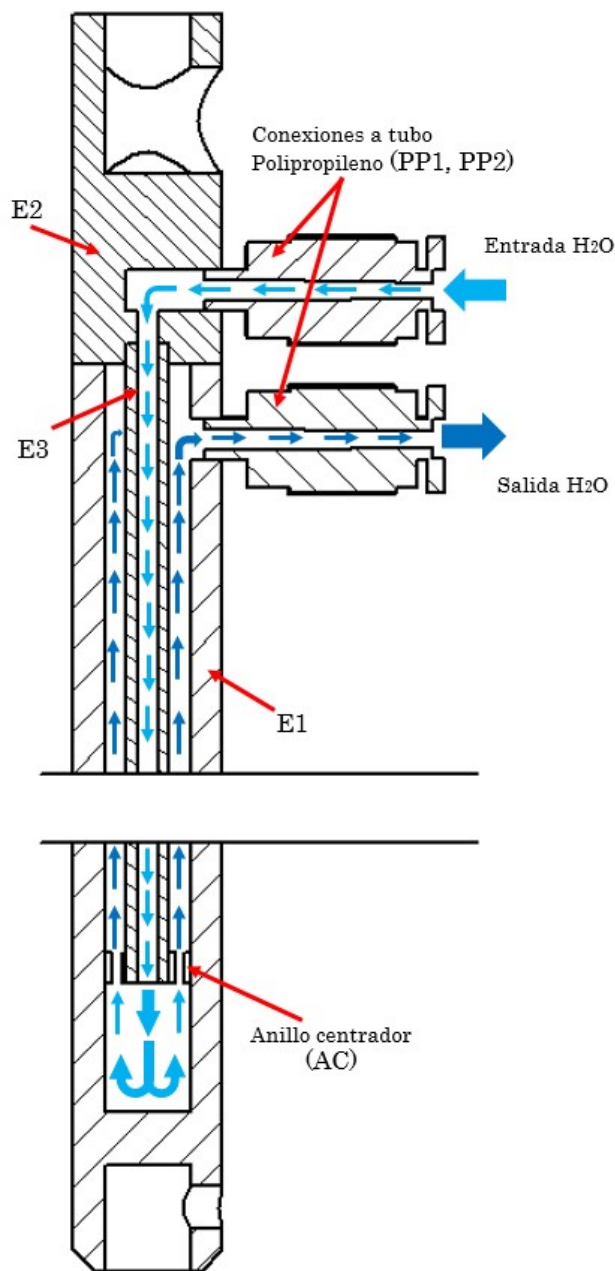


Figura 8.3: Recorrido del agua en la refrigeración del electrodo.

## 8.2. Aislamiento eléctrico

Es de vital importancia controlar el circuito eléctrico que se forma en el horno. Estimamos que para la fusión mediante arco eléctrico de aleaciones metálicas vamos a necesitar una fuente capaz de suministrar tensiones del orden de 50V (bajas tensiones) con intensidades de corriente de entre 60-90A. Esta fuente debe tener la capacidad de regular su intensidad de corriente ya que el proceso de fusión de muestras es progresivo y requiere de varias etapas de calentamiento.

Desde un principio se pensó que las fuentes para soldadura del *Campus de Tudela UPNA* serían unas fuentes adecuadas para los requerimientos de este proyecto. En caso de no ser adecuadas se debería realizar una inversión económica para comprar una fuente con las características necesarias.

Ya sabemos entonces el orden de magnitud de las intensidades que van a circular a través del electrodo de cobre. Como ya se ha detallado anteriormente el electrodo está fabricado en cobre debido a que este material es uno de los mejores conductores eléctricos que existen. También es un material muy empleado en el sector industrial y por tanto podemos obtenerlo en formas muy variadas (rods, tubes etc.) con un precio relativamente bajo.

Vamos a ver cual es el camino que sigue la corriente eléctrica desde su salida de la fuente hasta morir en tierra al finalizar su función.

Primero, la corriente suministrada sale de la fuente a través del cable de corriente. Las hebras de este cable conectan con el electrodo de cobre en E2.

El contacto hebras/cobre lo garantiza un tornillo de presión TOR.CABLE. Así pues, la corriente circula a través del volumen efectivo de cobre de E2 hasta E1.

Mencionar que este volumen efectivo debe ser lo suficientemente amplio como para garantizar una densidad de corriente adecuada. Este es uno de los motivos por los cuales la zona de refrigeración no puede ser todo lo amplia que se quiera, hay que salvar un volumen de cobre lo suficientemente grande para tener una  $\rho_{el\acute{e}ct.min.}$ .

Cuándo la corriente llega al final de E1, ésta se concentrará en la punta de Tungsteno. Cuándo la distancia entre ésta y el MOLDE de cobre situado en la parte inferior sea lo suficientemente pequeña, se producirá la ruptura dieléctrica del Argón y se creará el arco eléctrico. Este arco atravesará la muestra incrementando su temperatura hasta fundirla. La intensidad de corriente en esta etapa debe ser lo suficientemente grande como para incrementar la temperatura de la muestra hasta fundirla. Si aumentamos la intensidad desde la fuente, alcanzaremos temperaturas más elevadas.

Un mal diseño del electrodo podría hacer que la intensidad corriente en el arco eléctrico fuese significativamente menor que la de salida de la fuente. Es por esto por lo que debemos asegurarnos de cumplir con parámetros como la sección efectiva mínima de cobre necesaria, geometría de la punta de tungsteno, buen contacto entre hebras de cableado y electrodo etc.

Por último la corriente circulará a través del molde de cobre hasta morir en tierra.

La corriente realizará este camino siempre y cuándo sea el que menor resistividad eléctrica le ofrezca. Es por esto por lo que debemos garantizar un adecuado aislamiento eléctrico en aquellas zonas no deseadas por las que pudiera circular.

Uno de estos posibles caminos sería el del cuerpo de la persona que manipula el electrodo de cobre, motivo por el cuál éste se encuentra completamente recubierto por una serie de piezas de teflón antes descritas. El teflón, como la gran mayoría de materiales poliméricos posee una resistividad eléctrica elevada, éste es uno de los motivos por el que es estupendo para incorporarlo en esta zona.

Mencionar que vamos a trabajar con intensidades del orden de 60-100A y que una intensidad de 1A es más que suficiente para provocar una parada cardiorespiratoria a un ser humano.

Con el aislamiento de Teflón del electrodo (piezas TEF1, TEF2 y CAPERUZA) nos aseguramos que la corriente eléctrica circule por el núcleo de cobre hasta la punta de tungsteno. Además el diseño del aislamiento esta hecho de tal forma que resulta difícil que una persona pueda resultar lastimada por la corriente eléctrica.

### 8.3. Estanqueidad

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en este diseño es el de garantizar un buen control de la atmósfera interior del horno. La fusión de muestras para la obtención de BMGs debe realizarse necesariamente en una atmósfera con el menor número de impurezas posible. Elementos como el Oxígeno y el Nitrógeno poseen afinidad para la formación de compuestos como óxidos y nitruros no deseados, los cuales en caso de formarse modificarían la composición, estructura y propiedades de la muestra esperada.

Para realizar los procesos de fusión en unas condiciones adecuadas estimamos que el porcentaje de impurezas presentes en la atmósfera interior debería ser aproximadamente el mismo que el de impurezas presentes en el gas emplear (Argón N95). Este porcentaje se puede reducir aún más gracias a la muestra de titanio fundido (en T1), la cual absorberá el oxígeno residual fácilmente.

El motivo por el cual empleamos titanio (pureza) como elemento de “sacrificio” es porque posee una elevada habilidad para formar óxidos. Así pues es posible obtener una atmósfera con un porcentaje de impurezas aún menor que en el caso de únicamente realizar vacío e introducir Ar.

También debemos hablar sobre el diseño del volumen de la cámara, el cual se encuentra delimitado por las dimensiones de VR. Está optimizado de tal manera que posibilita albergar el menor volumen posible de gas a la vez que sus dimensiones son lo suficientemente grandes para resistir el shock térmico producido por las muestras fundidas en el interior, además de habilitar una zona de trabajo adecuada para trabajar cómodamente.

En definitiva, reducir el volumen de la cámara lo máximo permitido nos permite conseguir una atmósfera adecuada de manera más fácilmente ya que es más sencillo conseguir una atmósfera de alta pureza si su volumen es pequeño que si es grande.

Para asegurar una alta pureza atmosférica en el interior es imprescindible realizar un buen sellado del horno. Las zonas con riesgo de fugas son aquellas en las que se produce la conexión de dos o más piezas mediante tornillos o simplemente por apoyo de unas sobre otras. Se da por supuesto que las uniones por soldadura no permiten el flujo de gas a través de ellas. Es por esto por lo que todas las uniones se han realizado por soldadura salvo aquellas en las que sea imprescindible su movilidad (piezas que participan en la extracción de moldes MOLDES-PM) o aquellas en las que los materiales de las piezas conectadas no sean aptas para la soldadura (VR-A1).

En las Figs. 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7 podemos ver estas 5 zonas de forma detallada:

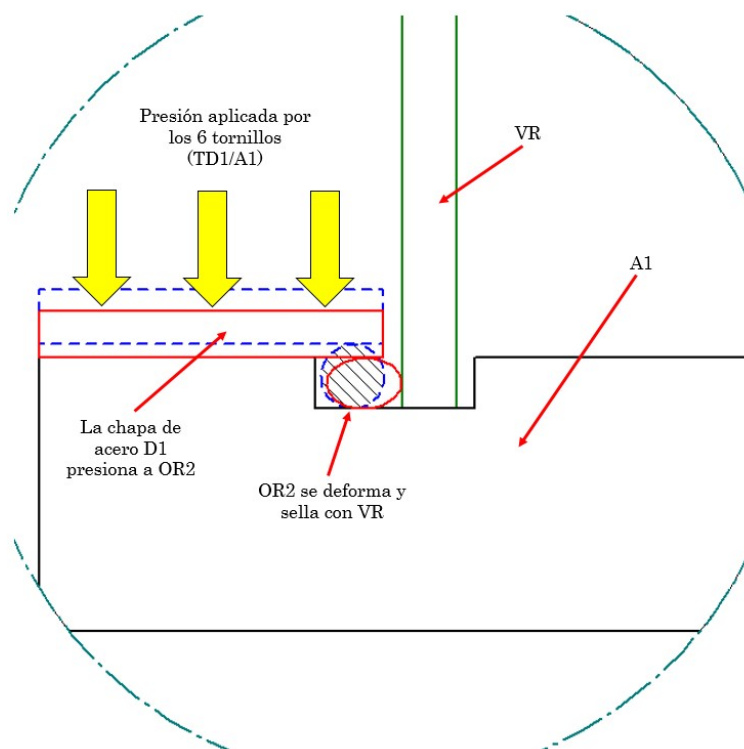


Figura 8.4: Sello VR-A1.

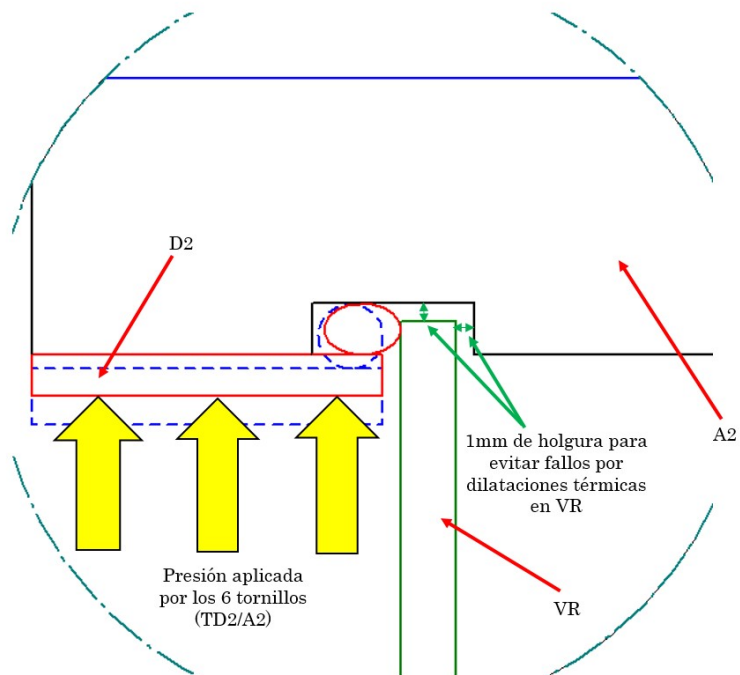


Figura 8.5: Sello VR-A2.



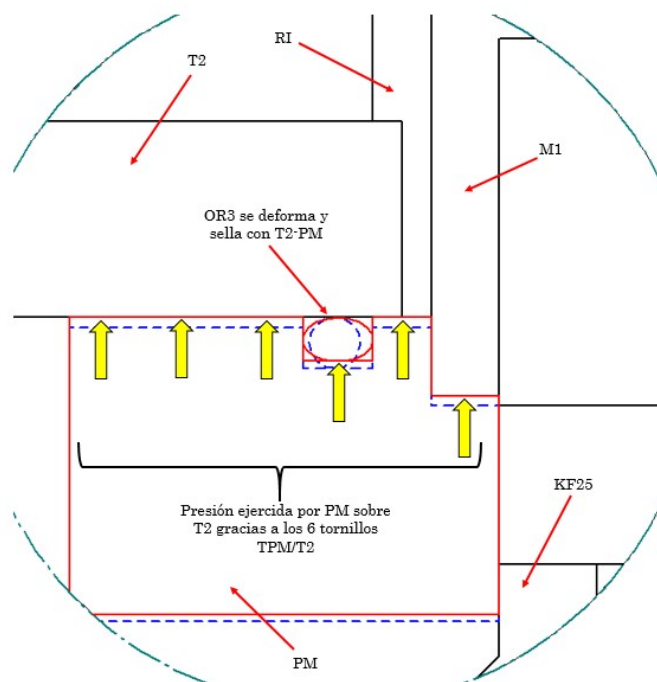


Figura 8.6: Sello PM-T2.

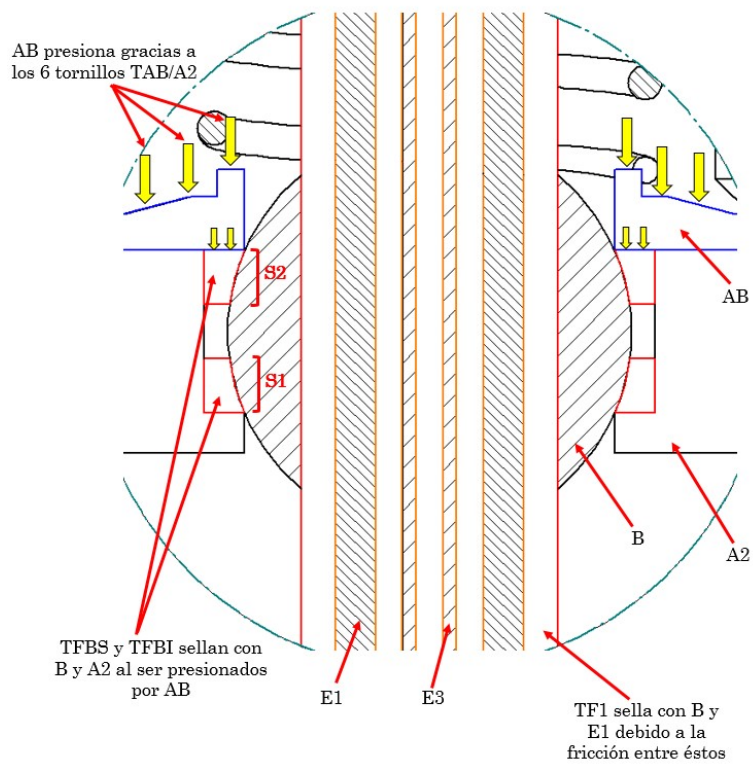


Figura 8.7: Sello B-A2 y E1-B.



En estas 5 zonas se ha realizado el sello mediante la instalación de materiales con baja permeabilidad gaseosa como el Vitón o fluorocarbono (permeabilidad) y el Teflón (permeabilidad), entre otros motivos por el de ser unos de los materiales más empleados en aplicaciones de bajo-medio vacío. El motivo por el cual las zonas BOLA-A2 y E1-BOLA se encuentran selladas con Teflon y no con Vitón es porque son piezas de movilidad que requieren de un bajo coeficiente de rozamiento con los sellos, además de una baja permeabilidad. Por tanto Teflon nos garantiza tanto el sello como el bajo coeficiente de fricción que estas zonas requieren, aparte de tener un coste asequible. También es relativamente cómodo prototipar los sellos de Teflón en la prototipadora rápida ya que es posible conseguir unas dimensiones realmente precisas.

Todos los diseños de las cavidades de los O-Rings han sido diseñadas de acuerdo a la Ref. [7].

## 8.4. Peso sistema de extracción de moldes

El sistema de extracción de moldes debe ser lo más ligero posible para que no suponga un gran esfuerzo físico producir un gran número de muestras de BMGs.

El diseño del horno y en especial de la zona de extracción de moldes (PM-KF25-OR3-M1) ha sufrido varias modificaciones debido a que resultaba demasiado pesado. En un primer diseño, la parte inferior del horno estaba constituida por una zona de extracción de moldes que pesaba aproximadamente 8Kg, un peso excesivo para un manejo ergonómico de una sola persona. A raíz de esto hubo que pensar en un rediseño de esta zona con el fin de aligerarla, se estimó que un peso adecuado sería de no más de 3Kg. Mediante un rediseño se consiguió reducir el peso de esta zona hasta aproximadamente 2,8 Kg.

## 8.5. Movilidad del electrodo

El electrodo debe tener la movilidad suficiente como para poder abarcar toda la zona en la que se va a realizar la fusión de muestras. A esta zona de la parte inferior del horno a la que debemos de ser capaces de acceder la vamos a designar como “zona de trabajo”.

La movilidad requerida por el electrodo para abarcar cualquier punto del espacio o, lo que es lo mismo, los grados de libertad espaciales que necesitamos son: translación sobre el eje OZ, rotación  $\theta$  respecto a OZ y rotación  $\varphi$  respecto a OX.

En la Fig.8.8 que sigue podemos ver estos grados de libertad con respecto al sistema de ejes coordenados.

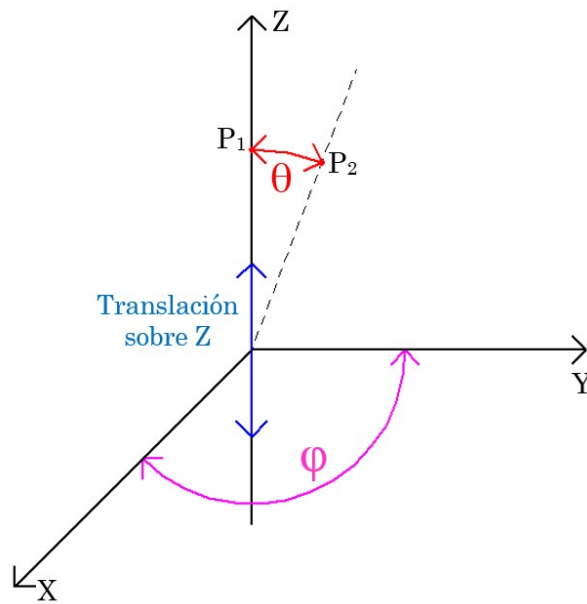


Figura 8.8: Grados de libertad del sistema de movilidad.

La movilidad que nuestro horno requiere se puede ver en la Fig.8.9.

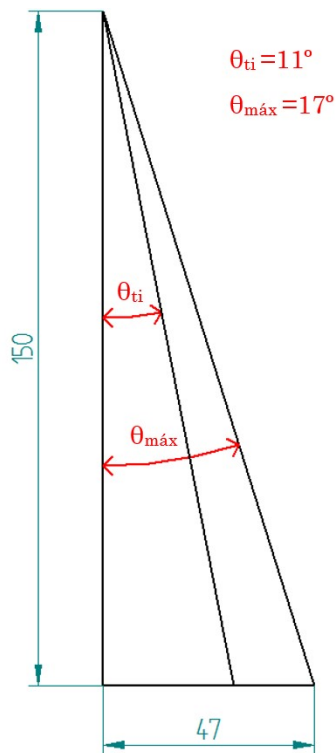


Figura 8.9: Movilidad requerida para el electrodo.

La movilidad que alcanzamos en nuestro sistema de movilidad se muestra en la Fig.8.10.

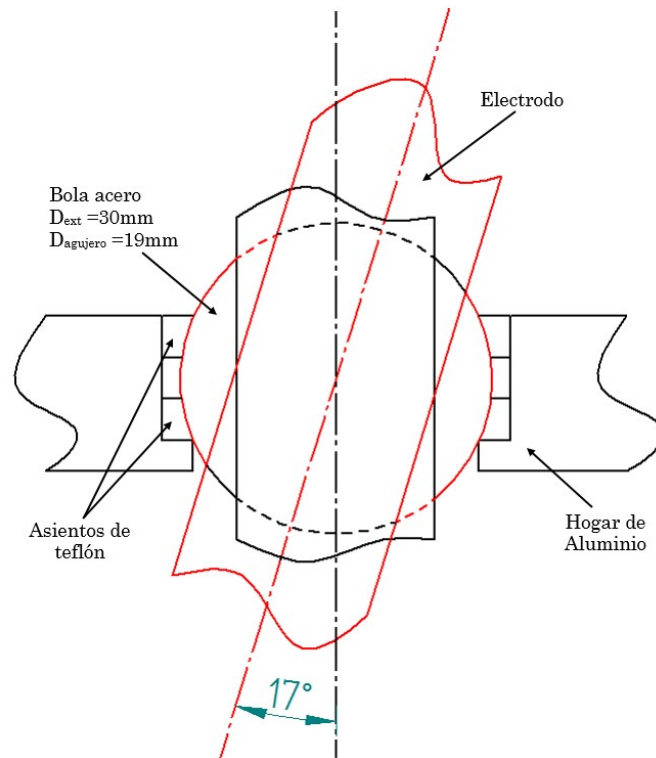


Figura 8.10: Movilidad permitida en nuestro diseño.

Para encontrar un sistema de movilidad que nos permitiese estos grados de libertad, lo primero que nos vino a la cabeza fué el sistema de apertura/cierre de las válvulas de bola empleadas en hidráulica. Aparte de por su movilidad, el motivo por el cual nos fijamos en este tipo de sistema fue porque tanto las válvulas de bola hidráulicas como las de vacío/gas aseguraban la estanqueidad de sus respectivos fluidos de manera muy eficaz y este requisito es imprescindible en nuestra aplicación ya que la zona de movilidad es con toda seguridad la más sensible a que se produzcan fugas gaseosas. Además, este tipo de válvulas son un producto bastante comercializado y de relativo bajo coste.

Debido a que el fluido que va a intervenir en nuestro horno es gas Argón ( y vacío en determinadas fases de la producción de muestras), conocer el sistema de sello de la válvula de bola para aplicaciones de gas/vacío habría sido el ideal. Pero hay que tener en cuenta que para conocer con precisión como funcionan estas válvulas es necesario adquirir una y desensamblarla para analizarla, ya que la información que aporta el fabricante es limitada.

Debido al excesivo precio de una de estas válvulas, entre 200 y 300 euros una de 3/4 inch, se tomó la decisión de emplear el sistema de sellos y movilidad de una válvula de bola para aplicaciones hidráulicas. El motivo que nos llevó a tomar esta decisión fue que el precio de éstas válvulas es considerablemente menor a las anteriores, costando menos de 15 euros una de 3/4 inch (una válvula de 3/4 inch hace referencia a que su diámetro interior es de esa magnitud). Ésta decisión tiene la incógnita de saber si el sistema de sellos de una válvula hidráulica es lo suficientemente efectivo como para garantizar la estanqueidad de gases en nuestra aplicación o en su defecto un ritmo de fugas lo suficientemente bajo.

En el diseño final del horno que hemos propuesto hemos empleado un sistema de movilidad mediante bola de acero y asientos de teflón muy similar al que posee una válvula de bola hidráulica. Pero antes de su implementación final, la manera correcta de proceder es realizar pruebas de

estanqueidad gaseosa en estas válvulas (prueba mediante la conexión de una de estas válvulas a un puerto de la cámara de vacío). Si los resultados de estas pruebas fuesen lo suficientemente favorables se podría emplear este sistema en nuestra aplicación, si no, deberíamos pensar en diseñar otro sistema de movilidad y/o de estanqueidad.

Una vez realizada la compra de varias de estas válvulas ( 1/2 y 3/4 inches) y comprendido su funcionamiento, quedó determinado que el movimiento de una bola de acero sobre unos asientos de teflón es lo que garantiza la movilidad. Por su parte, la estanquidad se logra gracias al íntimo contacto que estos asientos de teflón tienen con la bola de acero y con el “hogar” en el que se encuentran asentados. El diseño de precisión de estos asientos esta realizado de tal forma que su curvatura coincide con la de la bola, sólo de esta forma se logra el contacto necesario que asegura el sello.

En un primer momento, ya que estas válvulas son de precio reducido y estan muy comercializadas, se pensó en reutilizar las bolas, los asientos de teflón e incluso el “hogar” en el que ambos elementos se encuentran asentados de estas válvulas y así implementarlo todo en nuestro diseño.

Pero esta opción (la más cómoda) quedó rápidamente descartada por diversos motivos:

En primer lugar, la reutilización de los “hogares” fué descartada instantaneamente debido a que la movilidad requerida para nuestro electrodo a través de estos “hogares” era imposible. Por tanto quedó claro que debíamos diseñar nuestro propio “hogar” en la parte superior del horno.

En segundo lugar, las bolas poseían mecanizados no deseados en su superficie que dificultaban la estanqueidad del sistema en nuestra aplicación.

Por tanto también quedó descartada la reutilización de las bolas de acero de estas válvulas. Debíamos conseguir pues bolas de acero con una superficie sin ningún mecanizado adicional, únicamente con un agujero pasante interior centrado.

Además de esto, los sellos pertenecientes a cada tamaño de bola no permitían la movilidad que nosotros necesitamos y por este motivo debíamos seleccionar los sellos empleados en una bola de tamaño superior. Así pues con una bola de 1/2 inch (sin mecanizados adicionales) deberíamos emplear los asientos de teflón de una bola de 3/4 inch, con una bola de 3/4 inch unos asientos de una bola de 1 inch y así sucesivamente. Mencionar que la movilidad mínima necesaria en nuestro sistema se podría haber logrado con la combinación, bola de 3/4 inch y sellos de la bola de 1 inch.

Pero esta combinación también quedó descartada ya que, aunque lograba la movilidad requerida, estos sellos poseían una curvatura distinta a la de la bola con la que estaban en contacto, con lo que no se lograba un íntimo contacto entre ambas y tampoco el sello necesario. Es necesario pues fabricar nuestros propios asientos de teflón con una curvatura que se ajuste a las bolas que empleemos.

En definitiva, por los motivos que se acaban de ver no se pudo reutilizar ningún componente de una válvula de bola hidráulica.

## 8.6. Shock térmico del vidrio

Como ya se sabe, la parte media del horno y por tanto el volumen interior se encuentran delimitados por el tubo de vidrio de 3mm de espesor de pared y de 150mm de altura. Éste es un vidrio de la marca comercial alemana Duran®, es un vidrio del tipo borosilicato 3.3. La designación 3.3 hace referencia a su coeficiente medio de dilatación térmica lineal  $\alpha$ , el cual es de alrededor de  $3,3 \times 10^{-6} K^{-1}$ . La composición química de estos vidrios es rica en  $SiO_2$  ( $\sim 80\%$  en peso) con ligeras variaciones en los compuestos restantes ( $B_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ , etc.)

Para hacernos una idea vamos a comparar dos marcas de vidrios del tipo borosilicato, el Pyrex® y el Duran®:

La composición química en % aproximado de un vidrio de marca Pyrex® es de: 80,6 %  $SiO_2$ , 13 %  $B_2O_3$ , 4 %  $Na_2O$ , 2,3 %  $Al_2O_3$  y 0,1 % trazas diversas. La expansión térmica para éste es de  $3,25 * 10^{-6} K^{-1}$ .

Para un vidrio Duran® la composición química es aproximadamente de: 81 %  $SiO_2$ , 13 %  $B_2O_3$ , 4 %  $Na_2O + K_2O$  y 2 %  $Al_2O_3$ . Con una expansión térmica de  $3,3 * 10^{-6} K^{-1}$ .

Como podemos observar ambos vidrios poseen composiciones químicas muy similares, las cuales les hacen tener propiedades muy parecidas como una expansión térmica casi idéntica.

Mencionar que están disponibles en el mercado otras marcas de vidrios borosilicatos de baja expansión como el Kimax® y el Simax®, entre otros.

En el interior de nuestro horno vamos a tener muestras fundidas irradiando energía calorífica a las piezas que se encuentren en su campo de acción. Una de las piezas que más cantidad de energía va a absorber es el vidrio.

A parte de requerir un vidrio con un bajo coeficiente de dilatación térmica, para soportar esta energía irradiada nuestro vidrio necesita ser altamente resistente al impacto térmico o choque térmico (*thermal shock*). [6]

Mediante la consulta a diversas fuentes especializadas en la venta de vidrios hemos concluido que todos vidrios borosilicatos poseen aproximadamente la misma resistencia al impacto térmico. Según la web especializada de la Ref. [8], para un mismo espesor de pared de 3,2mm de vidrios Duran®, Pyrex®, Kimax® y Simax® la resistencia al impacto térmico es de 160. Para un espesor de 6,4mm de pared la resistencia al impacto térmico disminuye hasta 130 y para un espesor de 12,7mm la resistencia es de 90. Por tanto queda claro que existe una dependencia inversa entre la resistencia al impacto térmico y el espesor de la pared del vidrio. Por tanto a nosotros nos interesa un tubo de vidrio borosilicato 3.3 con un espesor de pared reducido.

Además del choque térmico nuestro vidrio debe de ser capaz de soportar 1bar de presión. Esta presión se ejercerá uniformemente sobre la cara exterior del tubo en el momento en el que el interior del horno se encuentre en vacío. La empresa española Vidrasa, especializada en este campo, aporta en su web una serie de expresiones matemáticas que nos permiten determinar el espesor mínimo de pared  $e$  que ha de tener un vidrio para soportar una determinada presión  $p$ . [9]

Combinando tanto el aspecto de la resistencia al choque térmico como la restricción del espesor mínimo ante una presión de 1bar hemos considerado que el espesor más conveniente para nuestra aplicación es de 3mm. Espesores menores no son de nuestro interés puesto que serían demasiado sensibles a la rotura. También hemos considerado que la altura del vidrio de 150mm era la más adecuada para cumplir con: la movilidad (a mayor altura mejor movilidad), el volumen interior (a mayor altura mayor volumen interior y por tanto mayor dificultad para realizar vacío e introducir gas), el choque térmico (a mayor altura menor choque térmico), la visibilidad (a menor altura peor visión del interior) y el coste (a mayor altura mayor costo). Poniendo en equilibrio todos estos factores una altura de 150mm es más que buena.

El vidrio que se encargó fué uno de marca Duran® y fué adquirido a través de la empresa Vidrasa. [9]

Mencionar que dado que no es un trabajo sencillo el de determinar con precisión cual va a ser el choque térmico que va a sufrir el vidrio a causa de la radiación emitida por un cuerpo negro, hemos tomado la decisión de probar empíricamente si este vidrio es adecuado o no. Mediante experiencia personal sabemos que en hornos en los que se funden cantidades de muestras similares

a las del nuestro y en los que se alcanzan temperaturas de hasta  $3000^{\circ}C$  se emplean vidrios del tipo borosilicato Pyrex®. En caso de que el vidrio Duran® fallase en servicio, podríamos implementar un vidrio Duran® templado, el cual tiene la capacidad de trabajar en condiciones mecánicas/térmicas más exigentes. En caso de que éste tampoco fuese efectivo podríamos emplear un tubo de cuarzo, el cual podría trabajar en condiciones aún mas extremas. No hemos seleccionado desde el primer momento un tubo de cuarzo por el simple motivo de que posee un precio 10 veces superior al de un borosilicato 3.3.

## Capítulo 9

# Renderizados

A continuación, en las Figs. podemos ver una serie de imágenes renderizadas del diseño del horno.

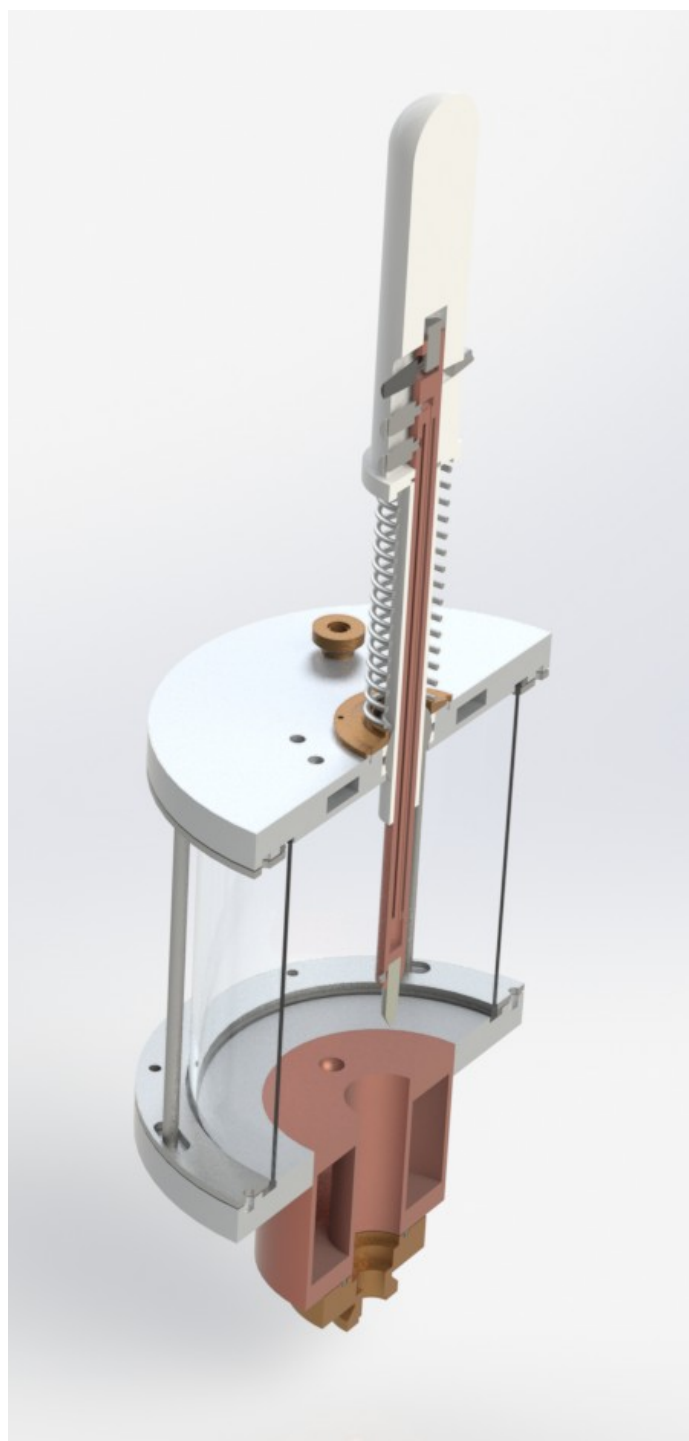


Figura 9.1: Corte 1.



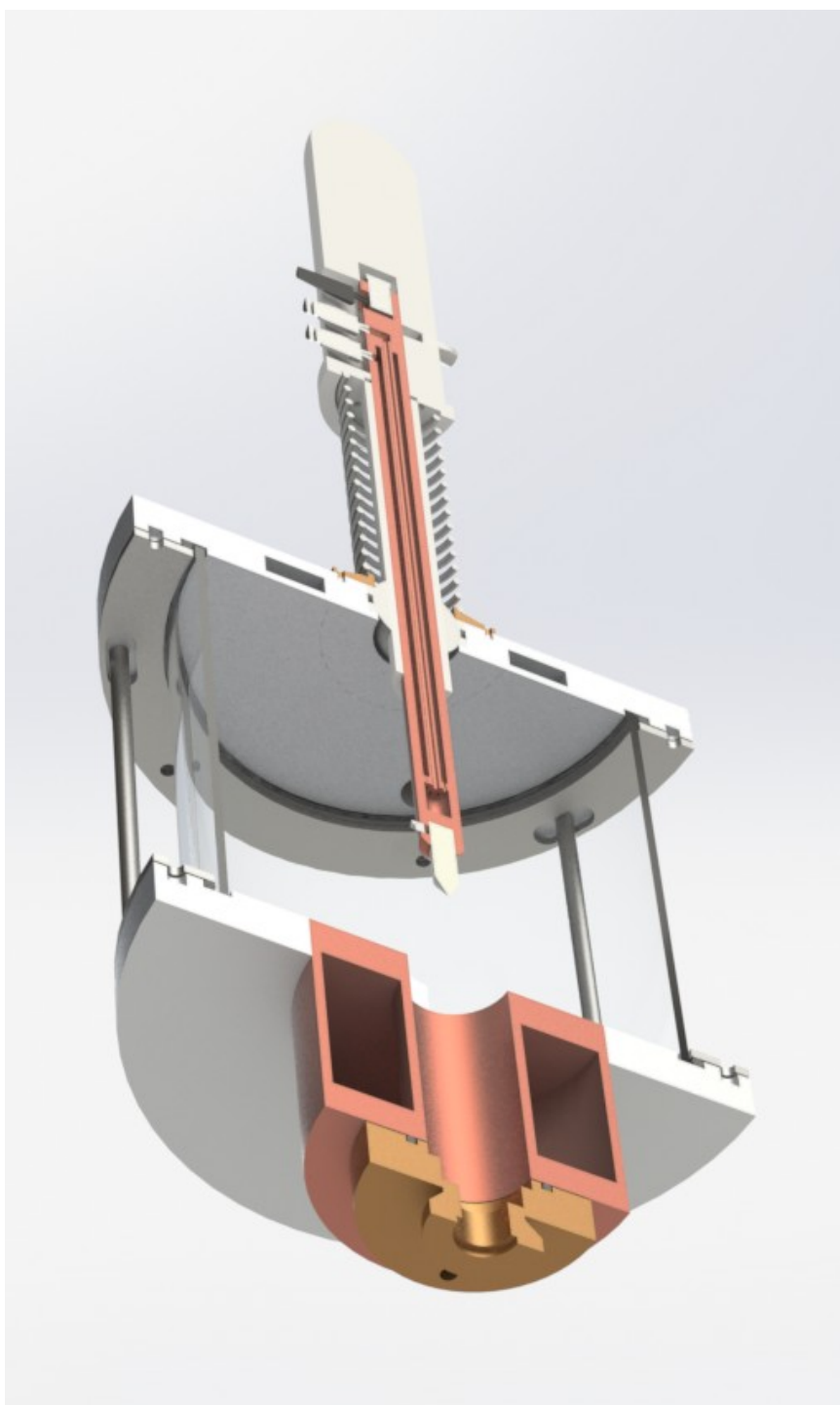


Figura 9.2: Corte 2.

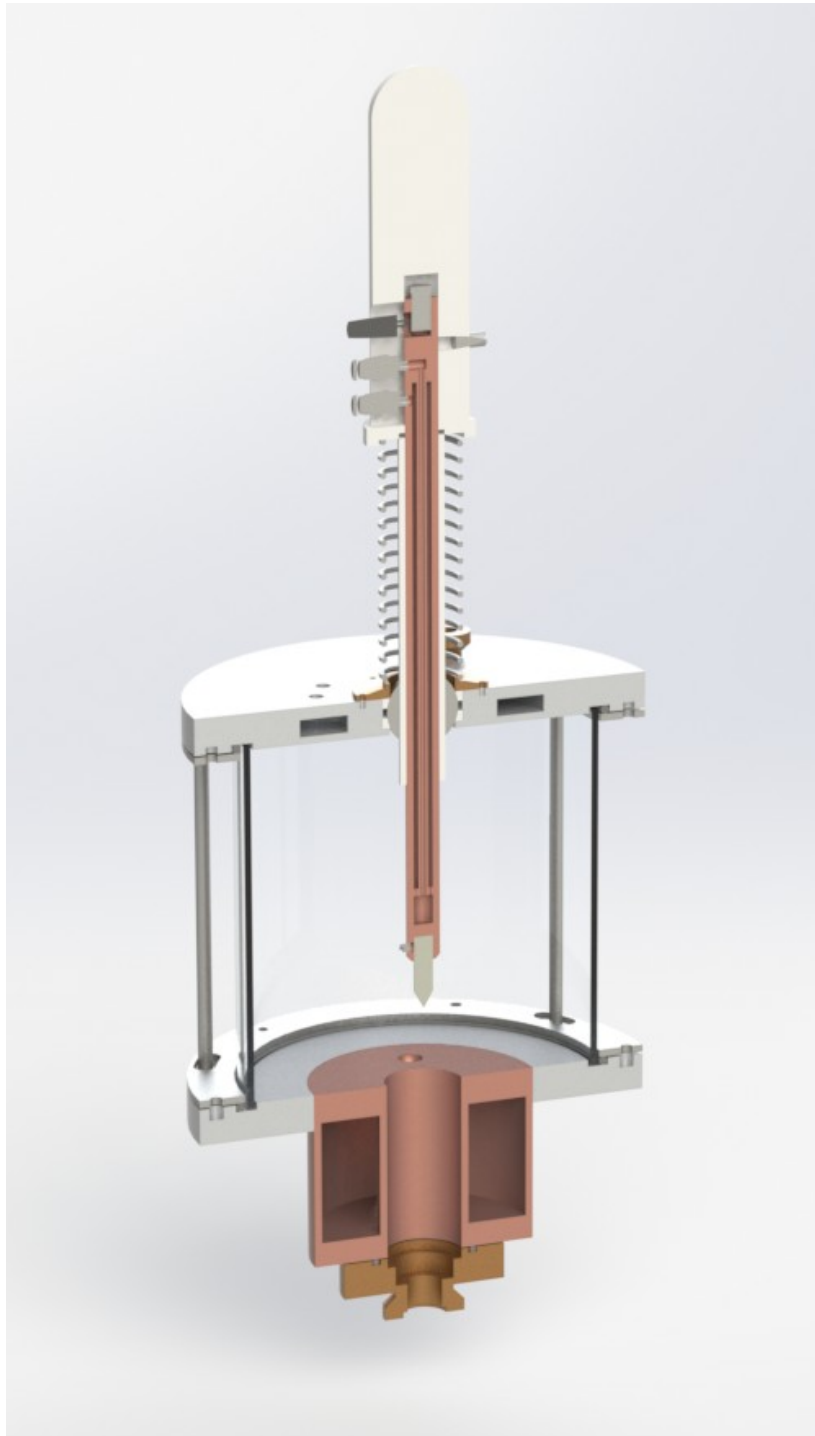


Figura 9.3: Corte 3.

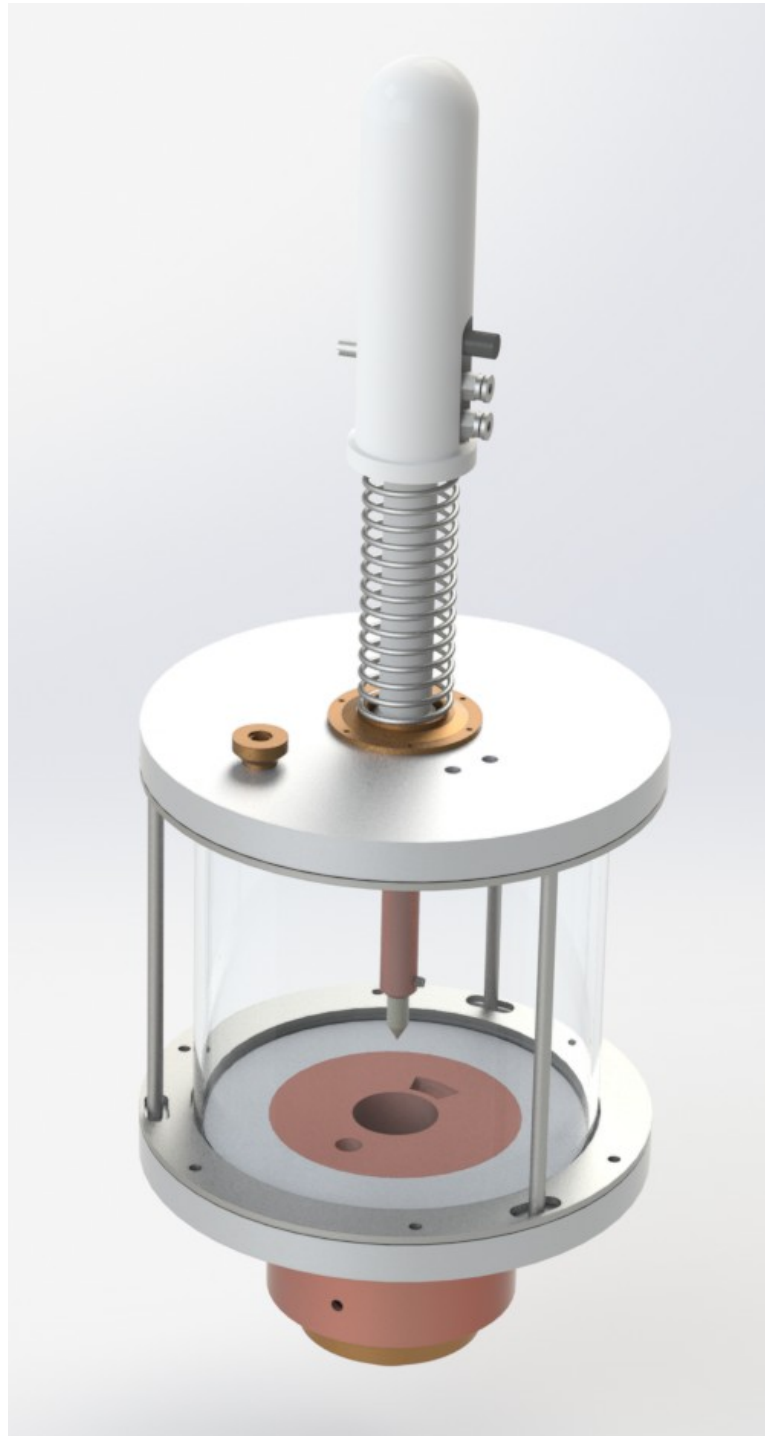


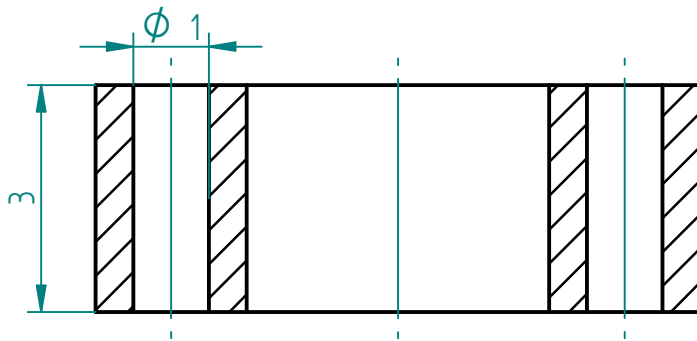
Figura 9.4: Horno completo.

# Bibliografía

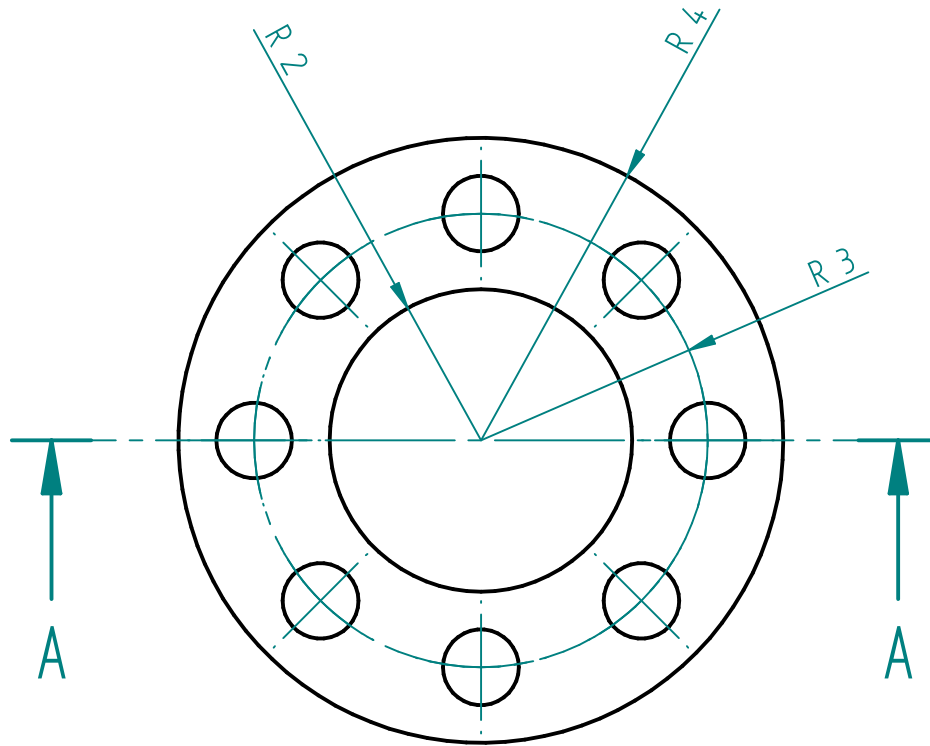
- [1] Duwez, P. (1981). Metallic glasses-Historical background. In Glassy Metals I, eds. H.-J. Güntherodt and H.Beck, pp. 19-23. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- [2] *Bulk Metallic Glasses*. C.Suryanarayana y A.Inoue. Ed. CRC Press, 2011.
- [3] <http://www.arcastinc.com/arc50.htm>
- [4] [http://web.ornl.gov/sci/physical\\_sciences\\_directorate/mst/abd/facilities.shtml](http://web.ornl.gov/sci/physical_sciences_directorate/mst/abd/facilities.shtml)
- [5] *Vacuum Vademecum*. Leybold, S.A.
- [6] [http://www.mrf-furnaces.com/acrmelt\\_ta200.htm](http://www.mrf-furnaces.com/acrmelt_ta200.htm)
- [7] *Materials for engineering*. L.H. Van Vlack. Addison-Wesley, 1982
- [8] *The properties of optical glass*. Eds. Bach y Neuroth. Springer-Verlag, 1998
- [9] *Machinery's handbook*. 27th edition. Industrial press, 2004.
- [10] <http://www.glassdynamicsllc.com/>
- [11] <http://www.vidrasa.com>

# ANEXOS

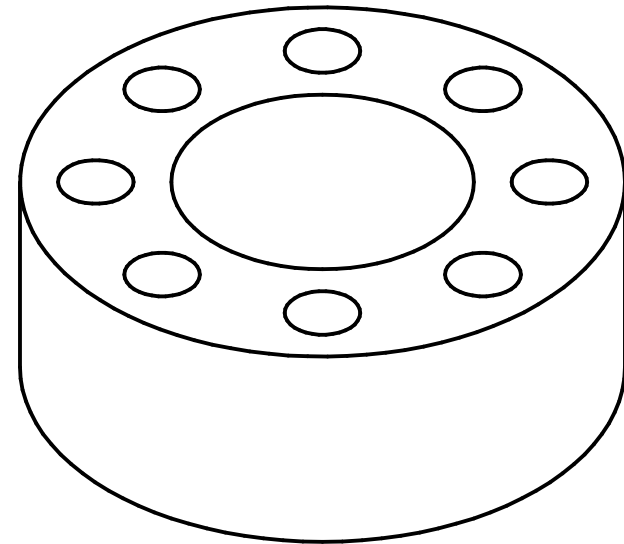




CORTE A-A



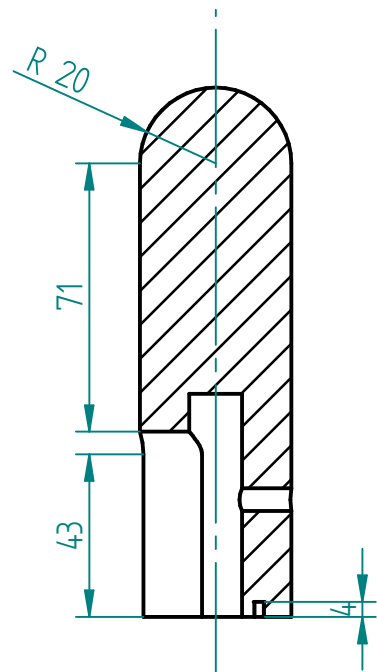
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



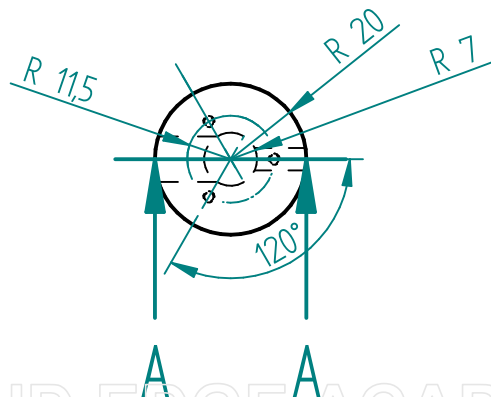
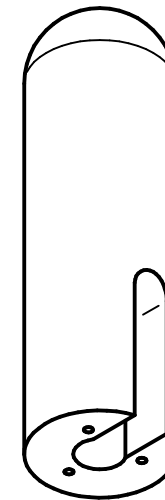
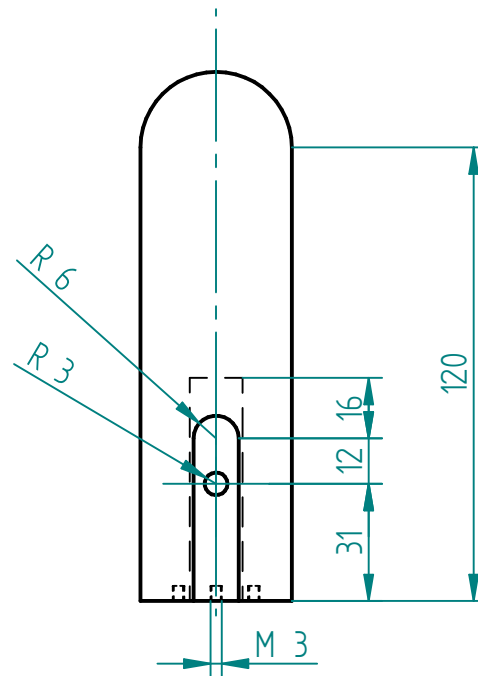
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15			
Comprobado			Título  AC		
Aprobado I					
Aprobado 2					
COPY			A4	Plano	Rev
			Archivo: AC.dft		
			Escala	10:1	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



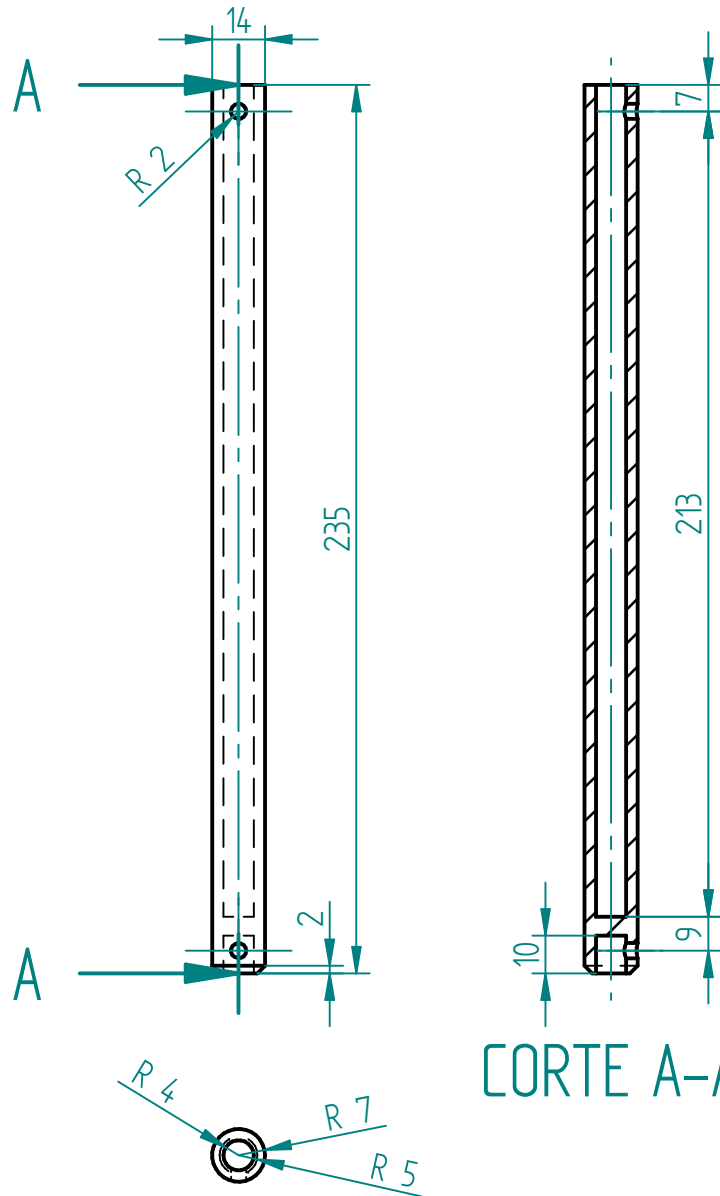
CORTE A-A



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15			
Comprobado			Título <b>CAP</b>		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
<div>PROY</div>			A4	Plano	Rev
			Archivo: CAP.dft		
			Escala	1:2	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



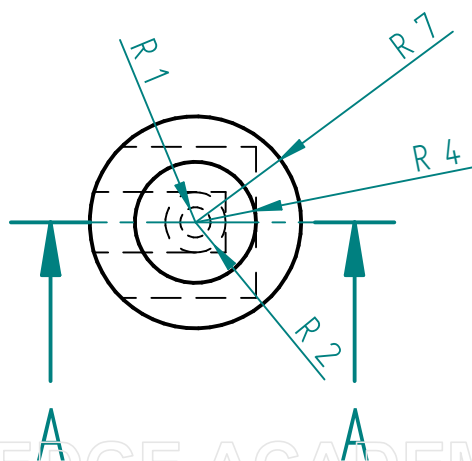
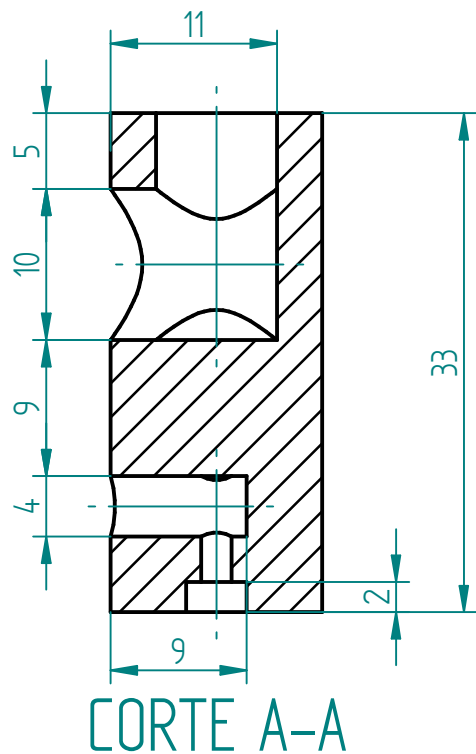


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

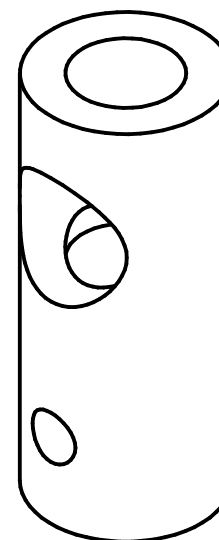


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software			
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15				
Comprobado			Título			
Aprobado I						
Aprobado 2						
COPY			A4	Plano	E1	Rev
			Archivo: E1.dft			
			Escala	I:2	Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



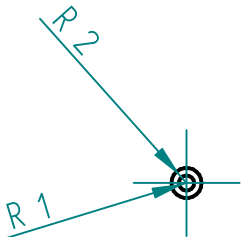
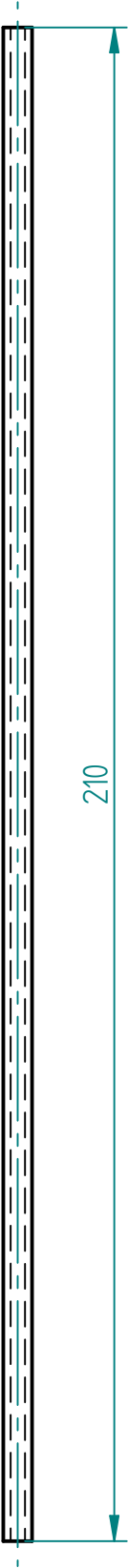
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15		
Comprobado			Título E2	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
			Archivo: E2.dft	
			Escala 2:1	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

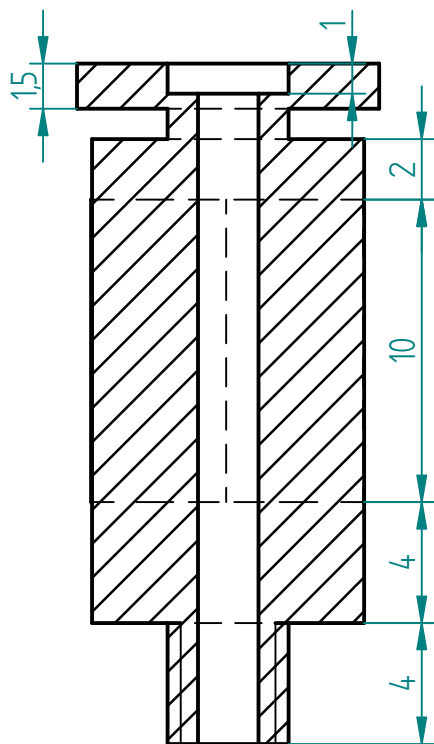
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



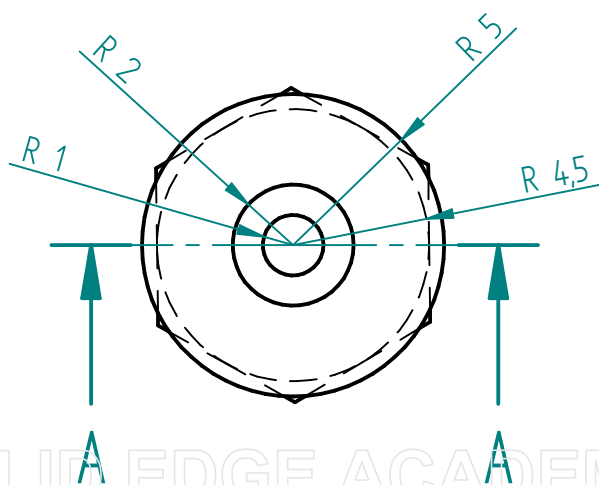
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15		
Comprobado			Título E3	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Archivo: E3.dft	
			Escala	1:1
			Hoja 1 de 1	

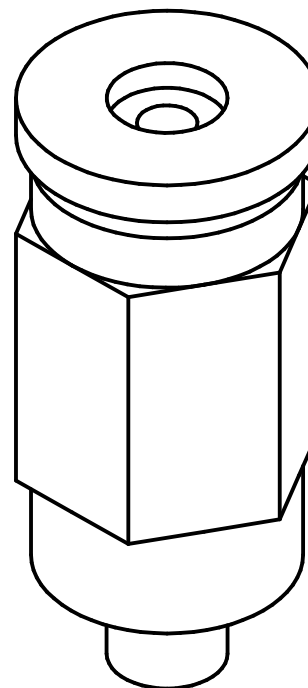
Rev



CORTE A-A



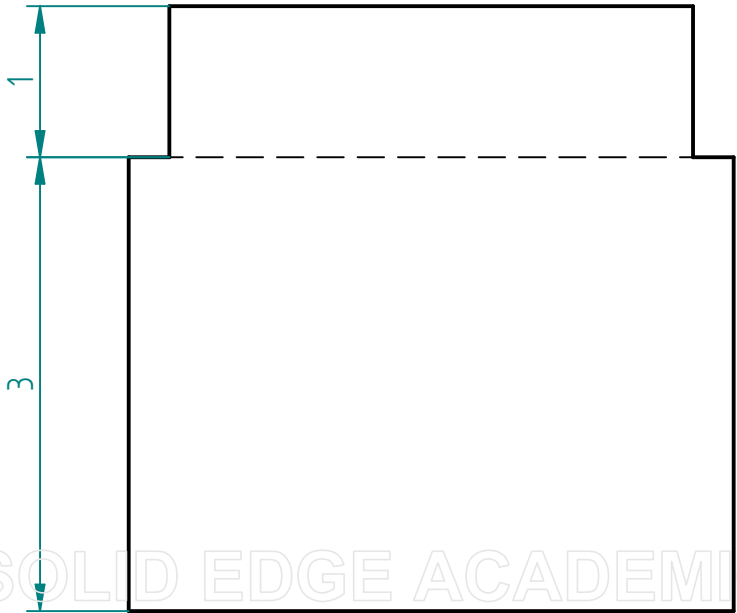
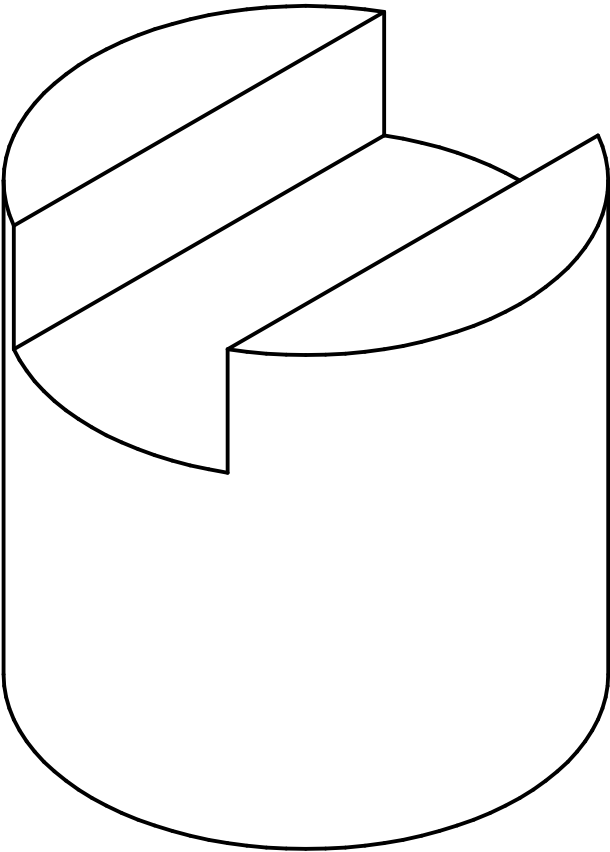
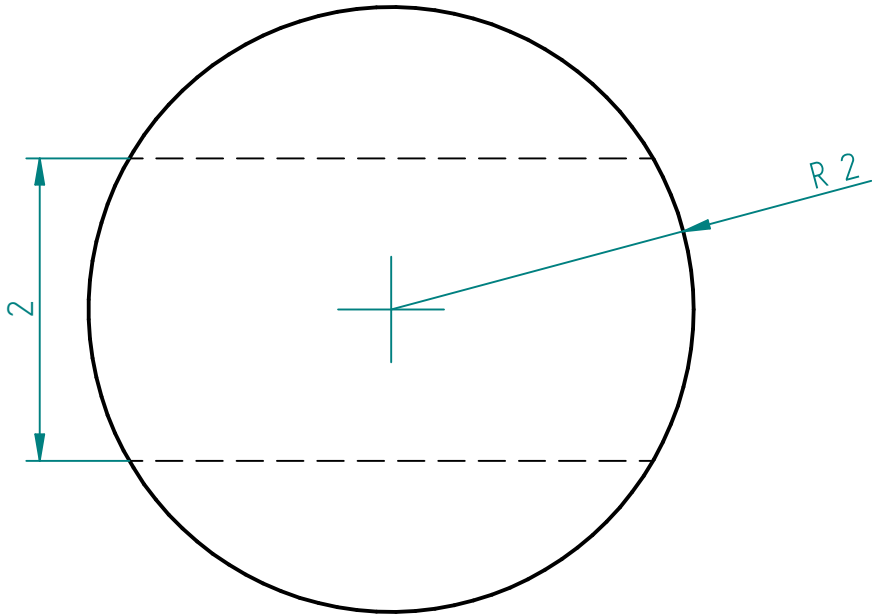
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15		
Comprobado			Título PP1_PP2	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
			Archivo: PP1_PP2.dft	
			Escala 4:1	Hoja 1 de 1

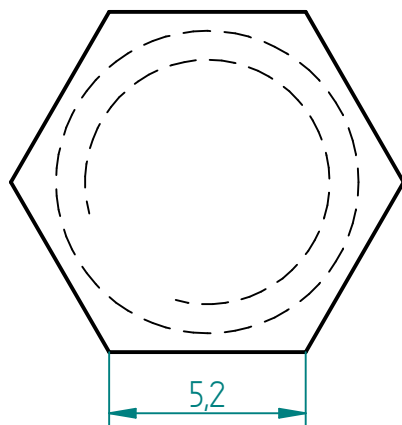
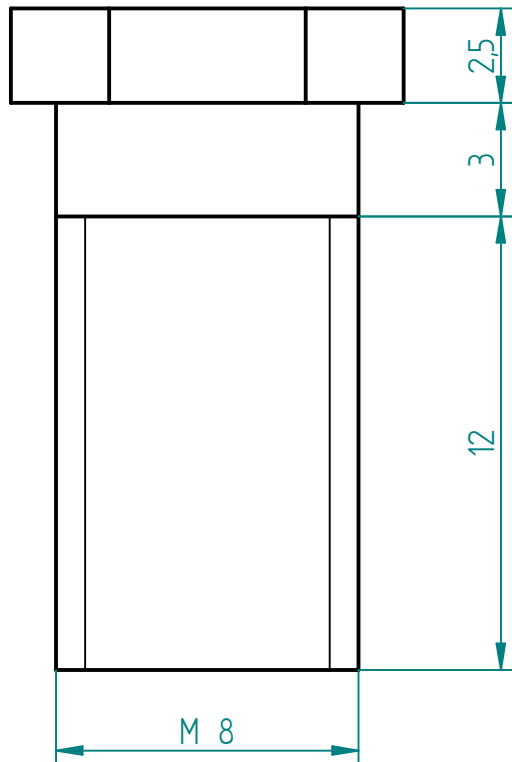
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

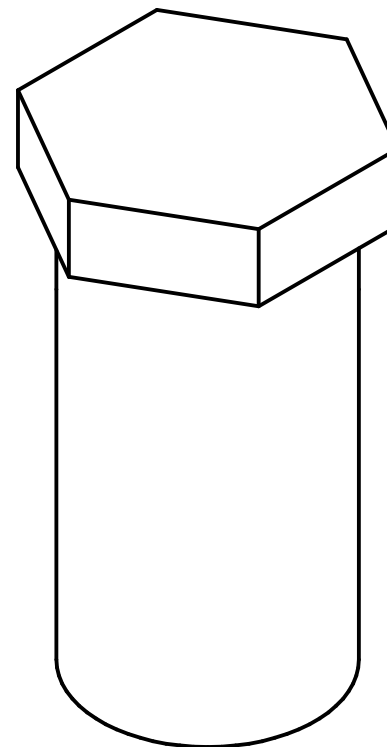


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15		
Comprobado			Título PW	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Archivo: PW.dft	
			Escala	20:1
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



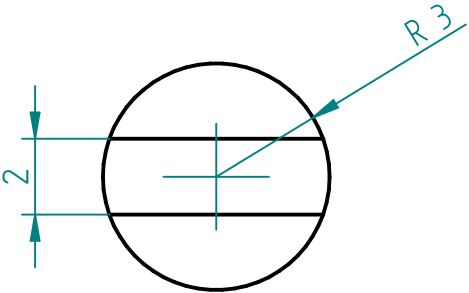
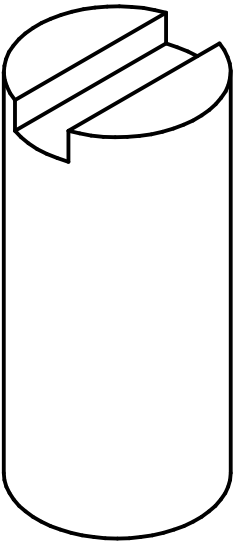
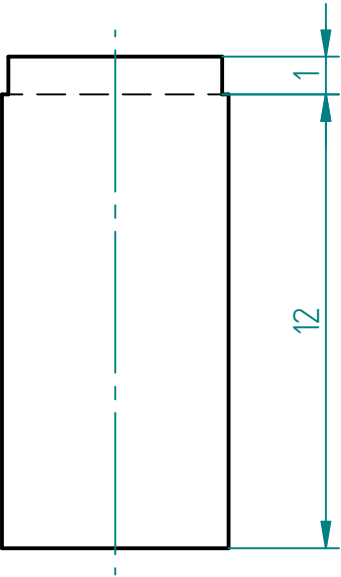
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



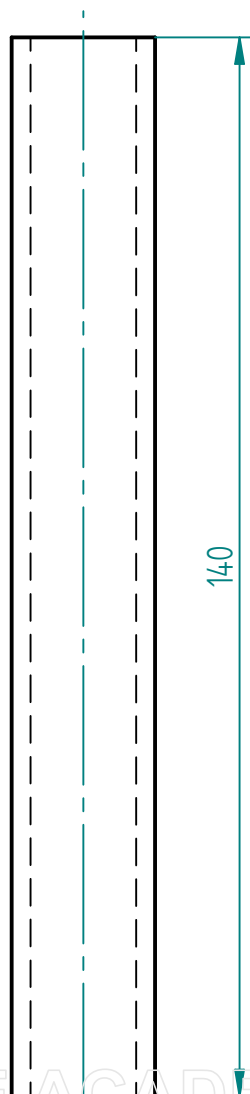
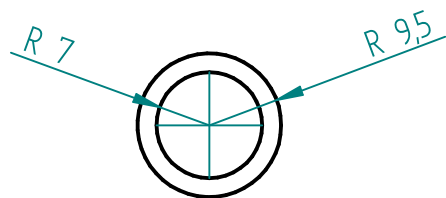
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15	Título  TCAB		
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: TCAB.dft		
			Escala	5:1	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

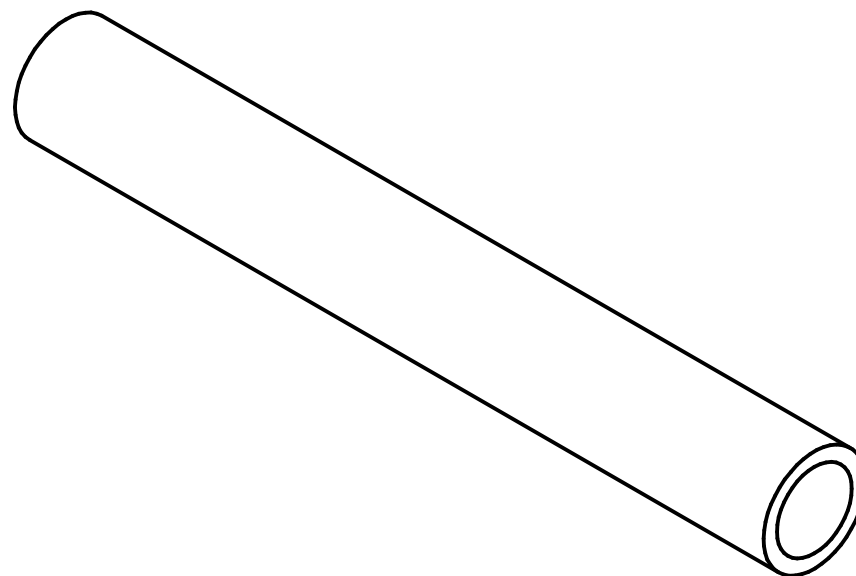
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<div>Solid Edge ST</div> <div>Siemens PLM Software</div>		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15			
Comprobado			<div>Título</div> <div>TCAP</div>		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
<div></div>			A4	Plano	Rev
			Archivo: TCAP.dft		
			Escala	5:1	Hoja 1 de 1



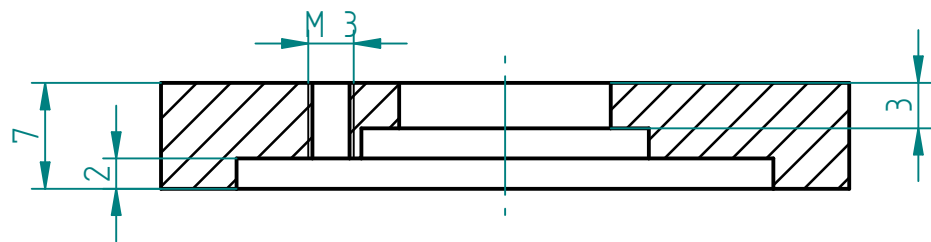
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



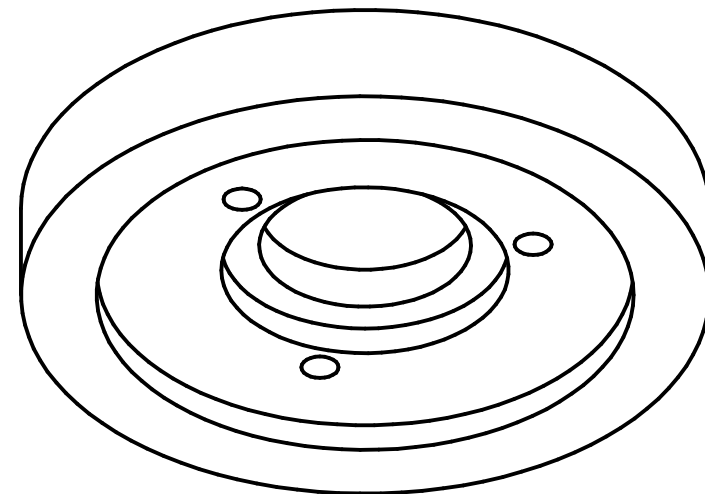
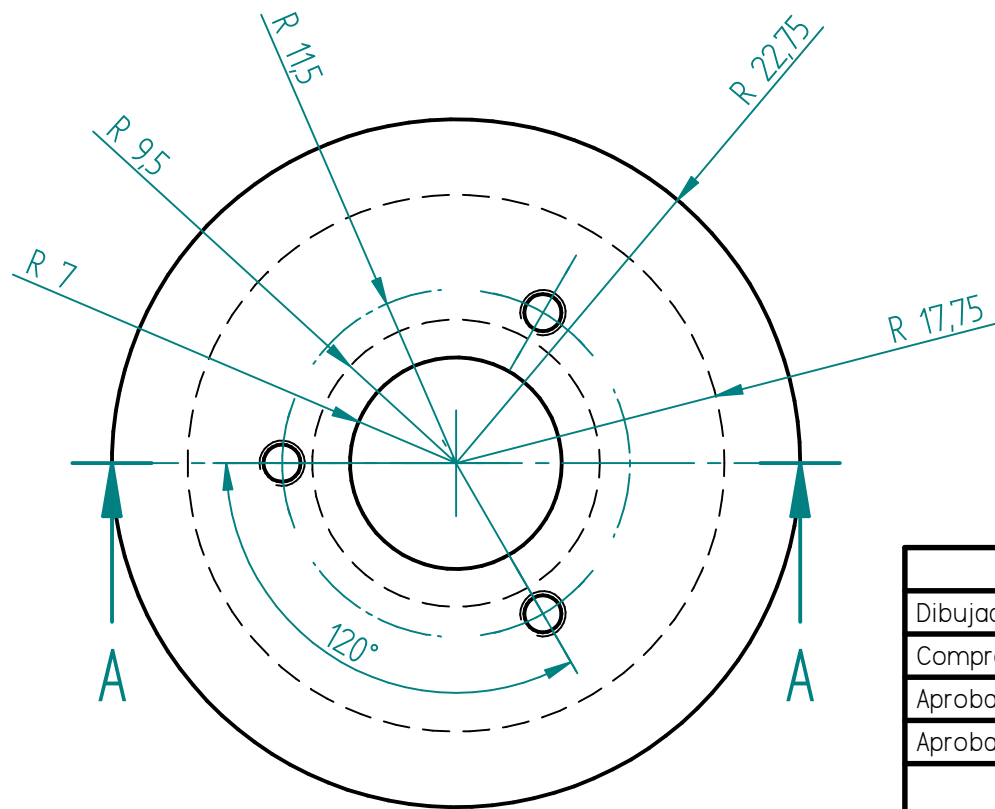
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15	Título TF1		
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
COPY			A4	Plano	Rev
			Archivo: TF1.dft		
			Escala	1:1	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY





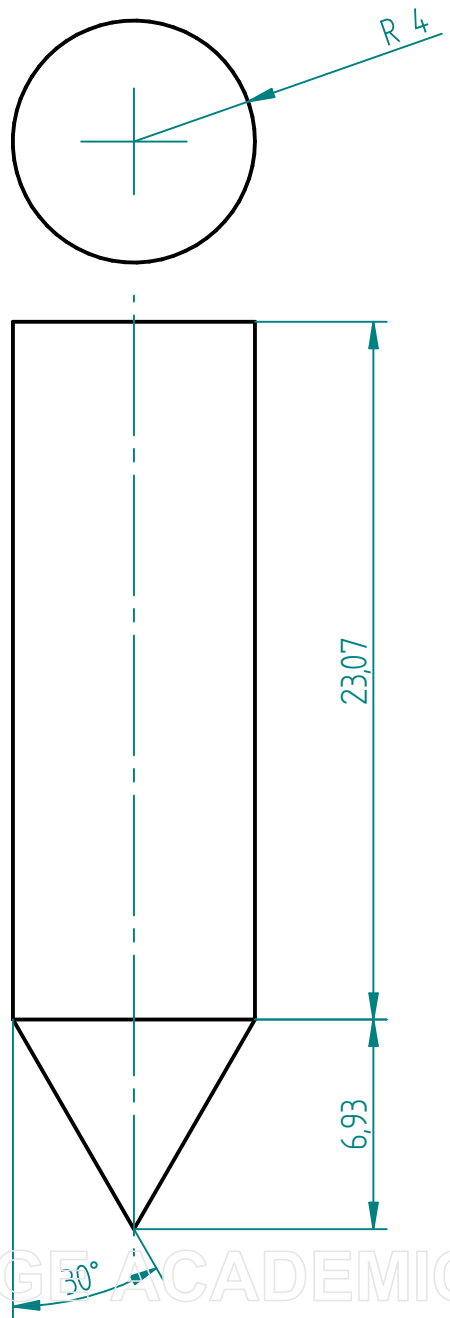
CORTE A-A



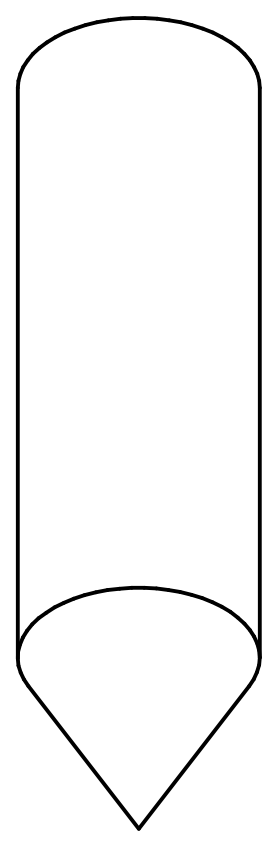
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

			<b>Solid Edge ST</b>	
			Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15	Título <b>TF2</b>	
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
			Archivo: TF2.dft	
			Escala	2:1
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

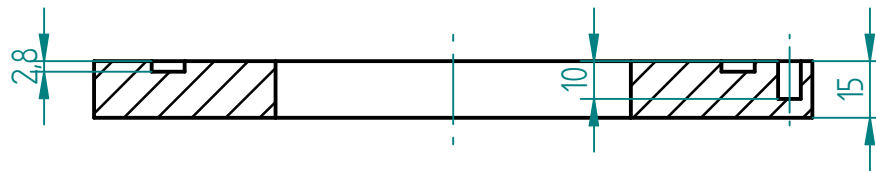


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



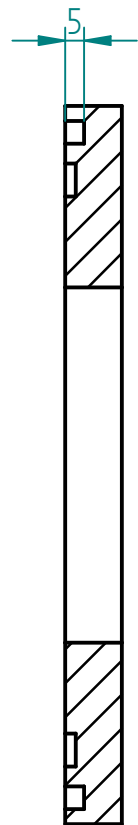
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15	Título W		
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2			A4PlanoRev Archivo: W.dft Escala4:lHoja 1 de 1		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

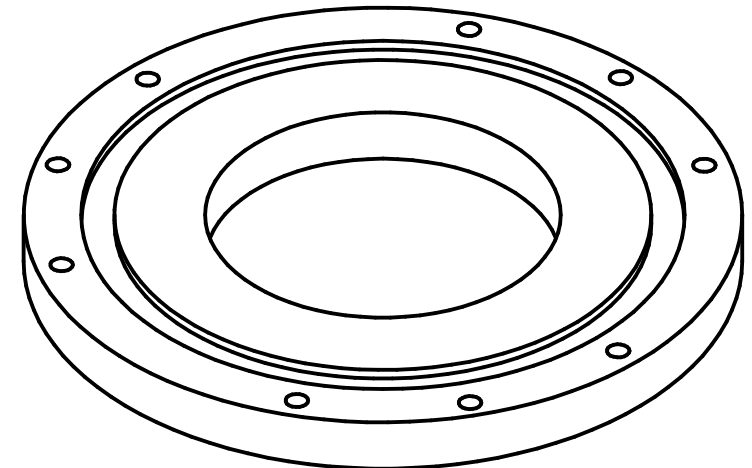
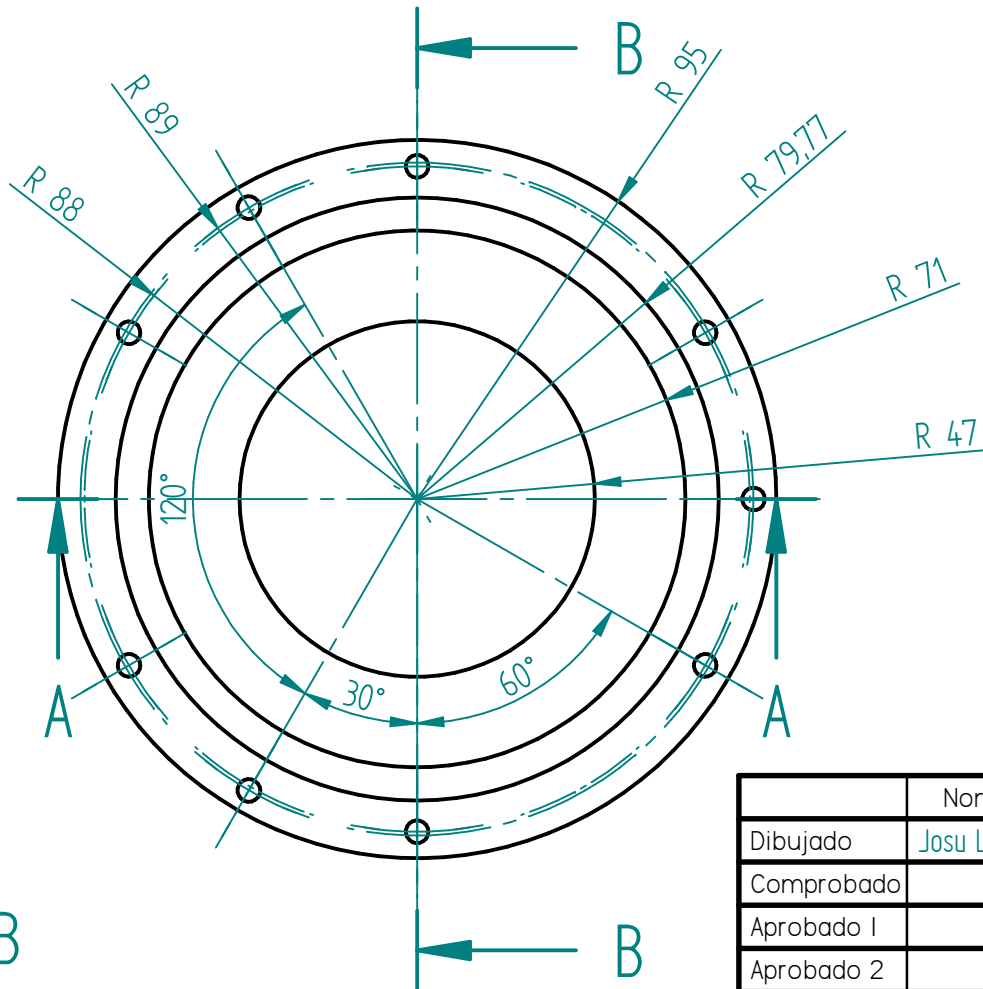


CORTE A-A

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



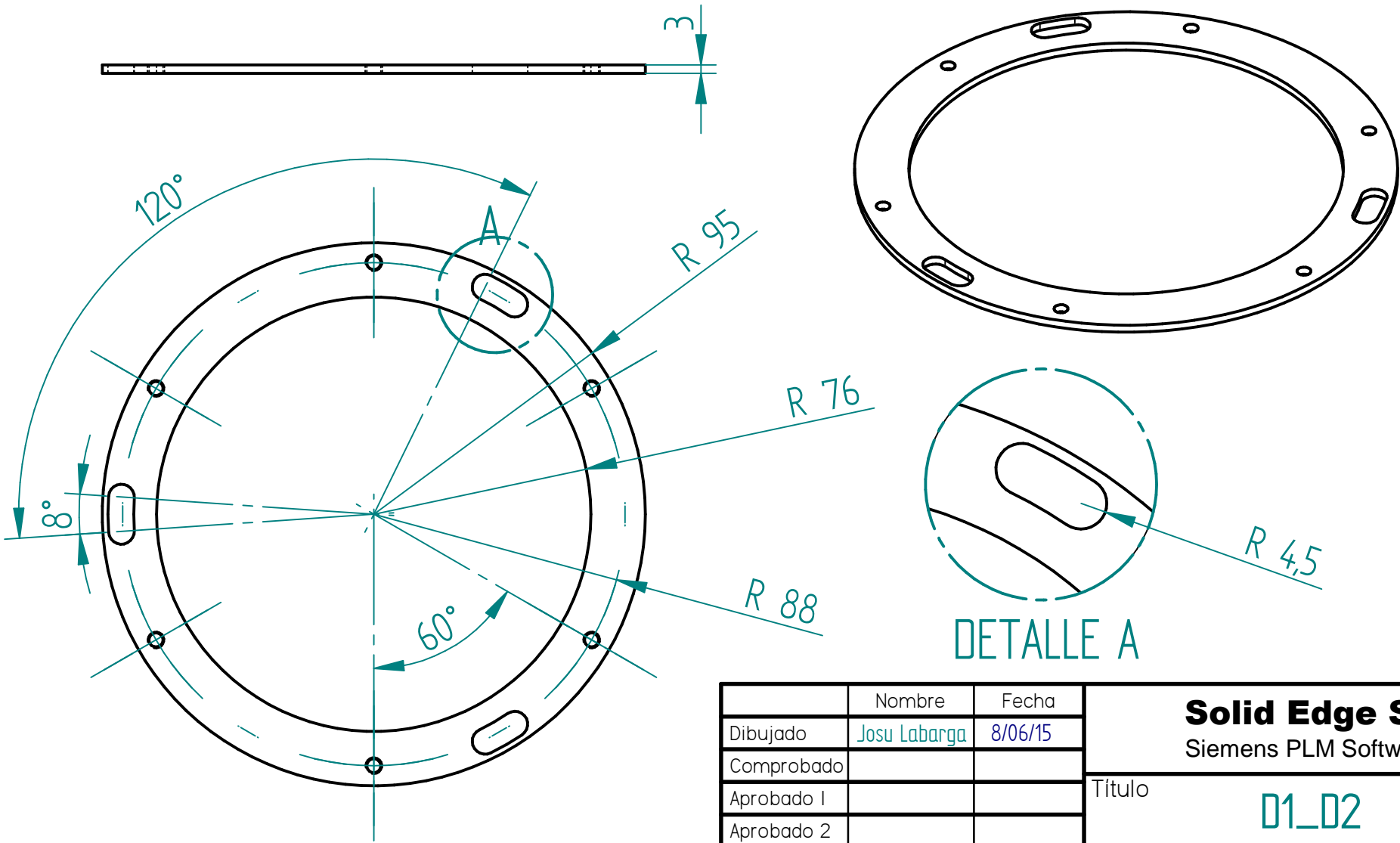
CORTE B-B



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título <b>A1</b>	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
			Archivo: A1.dft	
			Escala	l:2 Hoja 1 de 1

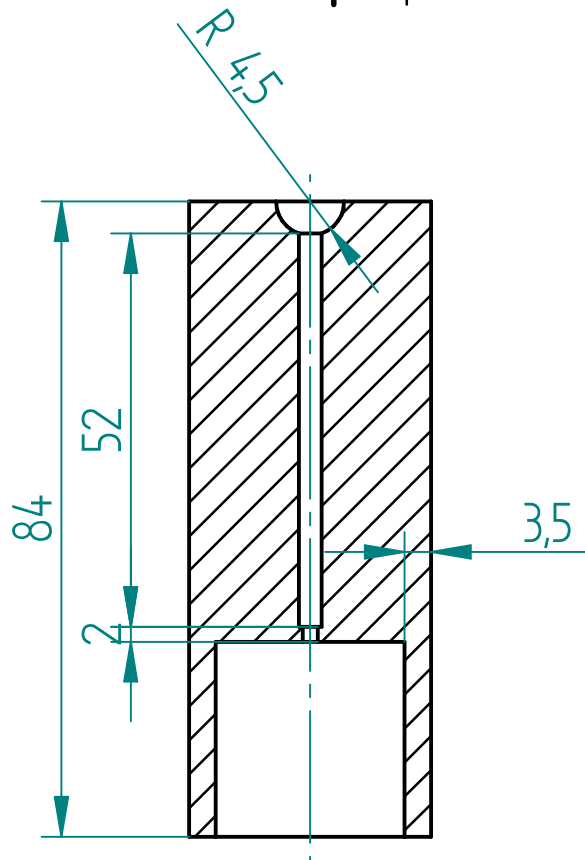
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

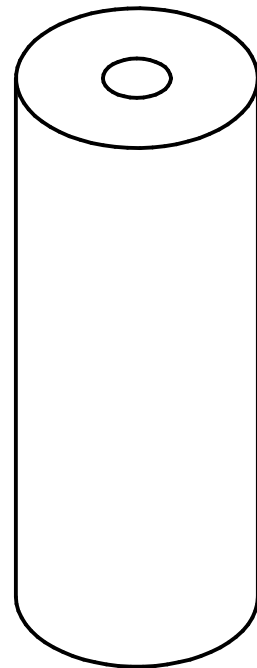
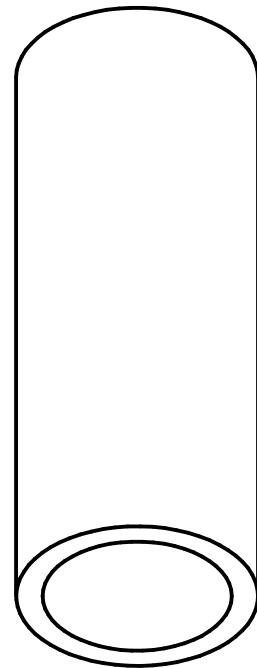
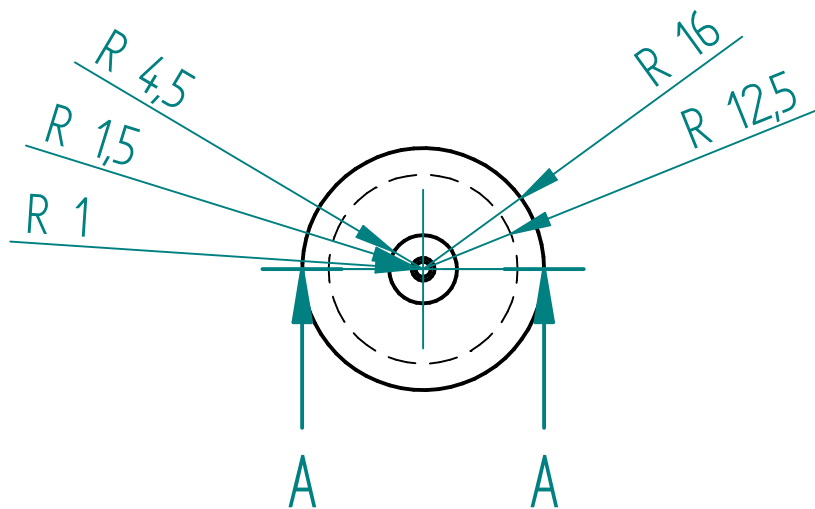


			<b>Solid Edge ST</b>	
			Siemens PLM Software	
Dibujado	Nombre Josu Labarga	Fecha 8/06/15	Título <b>D1_D2</b>	
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Rev	
			Archivo: D1_D2.dft	
			Escala	Hoja 1 de 1

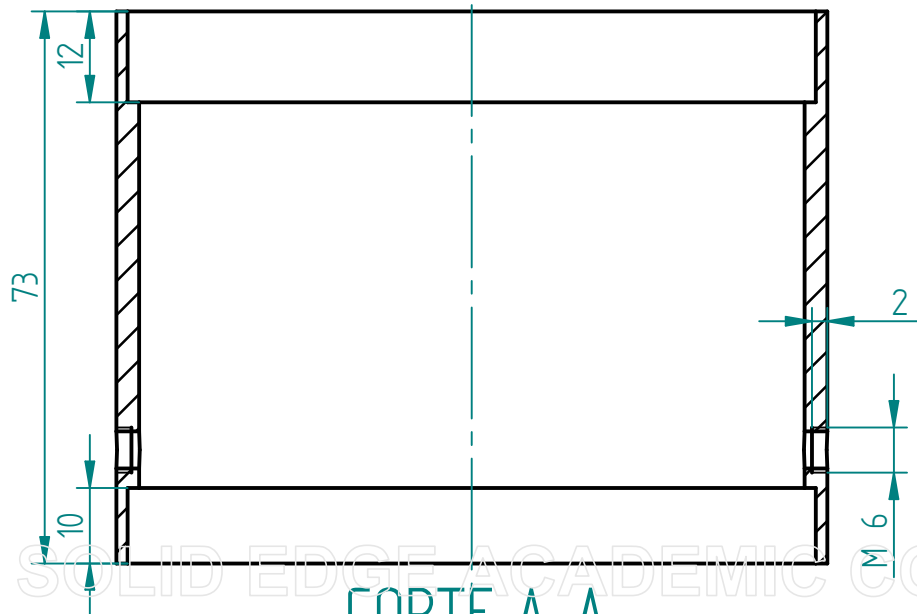
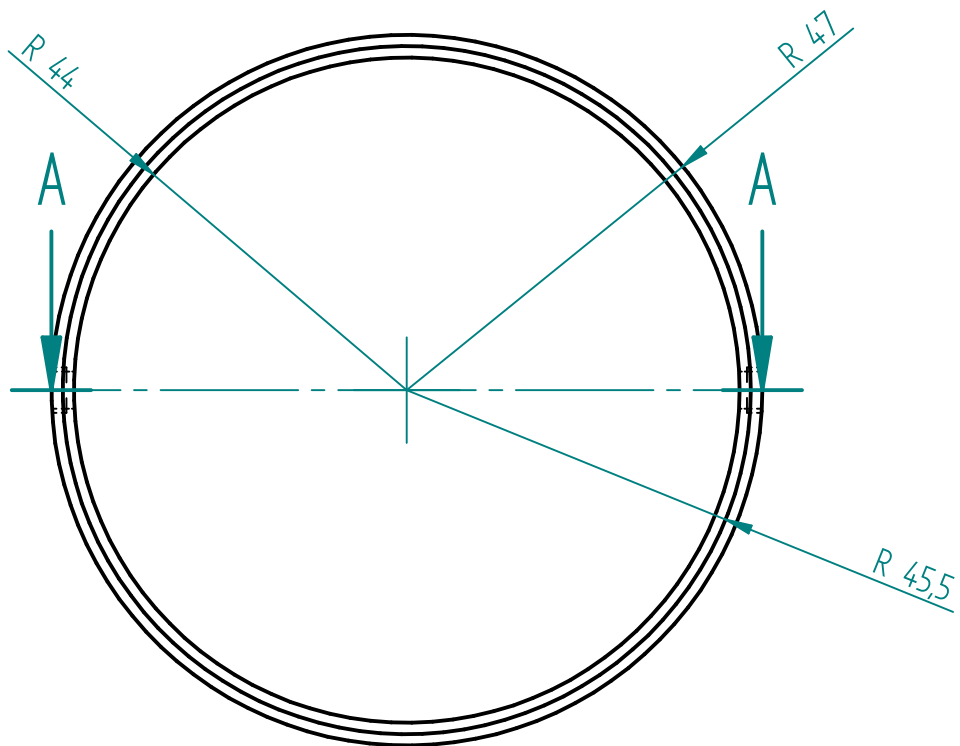
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



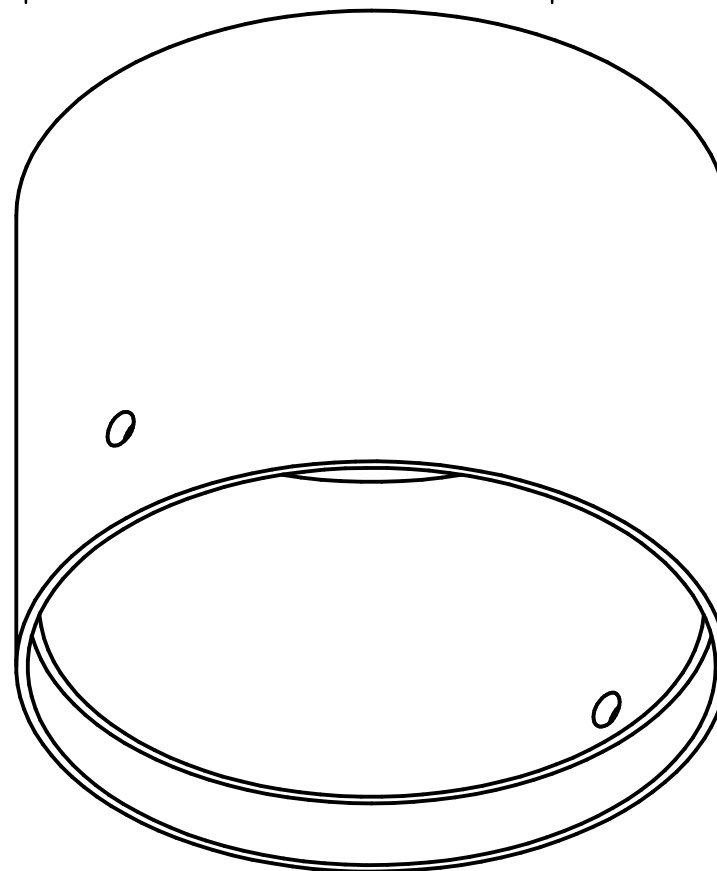
CORTE A-A



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título M1	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
SOLID EDGE ACADEMIC COPY			Archivo: M1.dft	
			Escala	Hoja 1 de 1

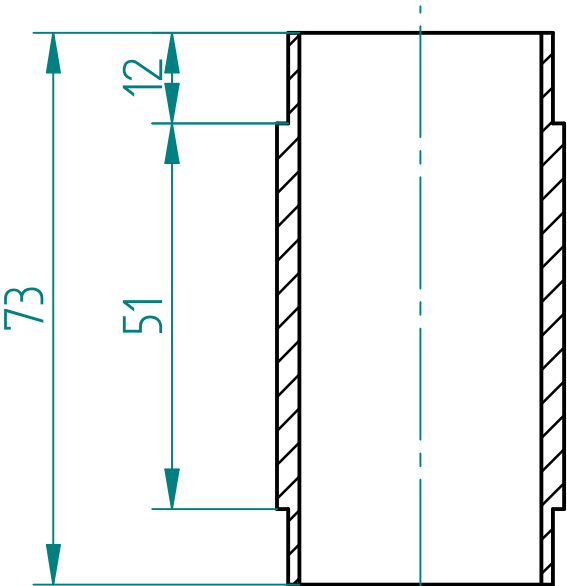


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

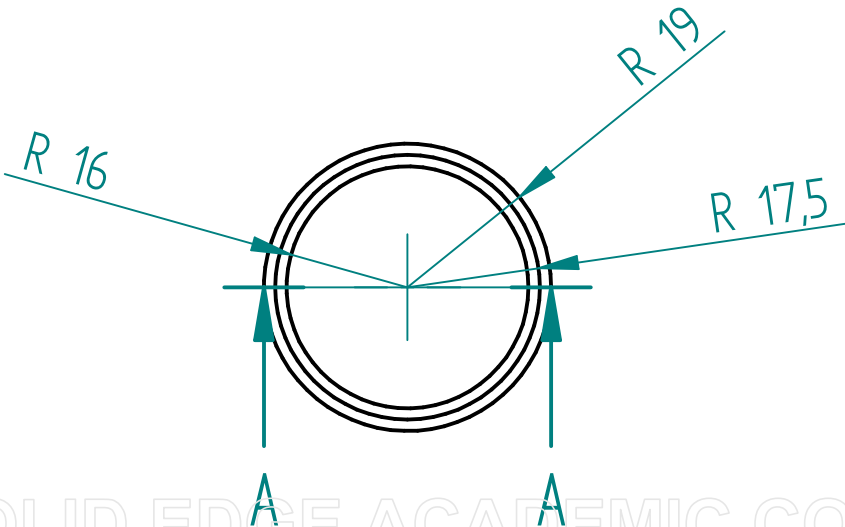
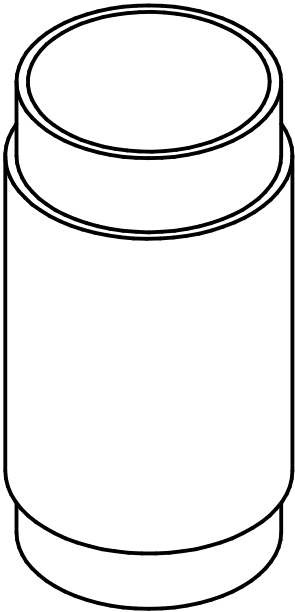


			<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	Fecha 8/06/15		
Comprobado			Título <b>RE</b>	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Archivo: RE.dft	
			Escala	Hoja 1 de 1

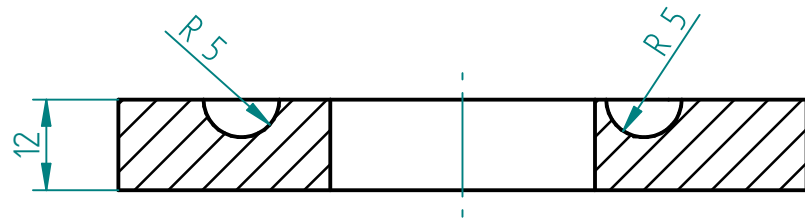
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



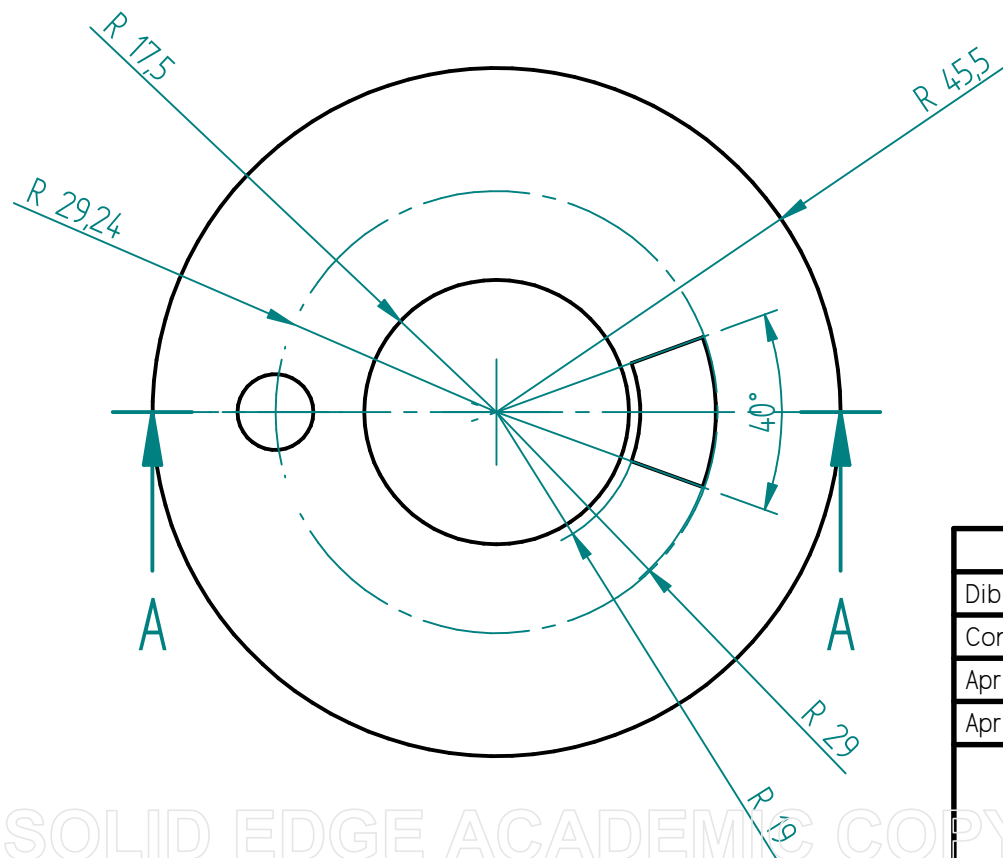
CORTE A-A



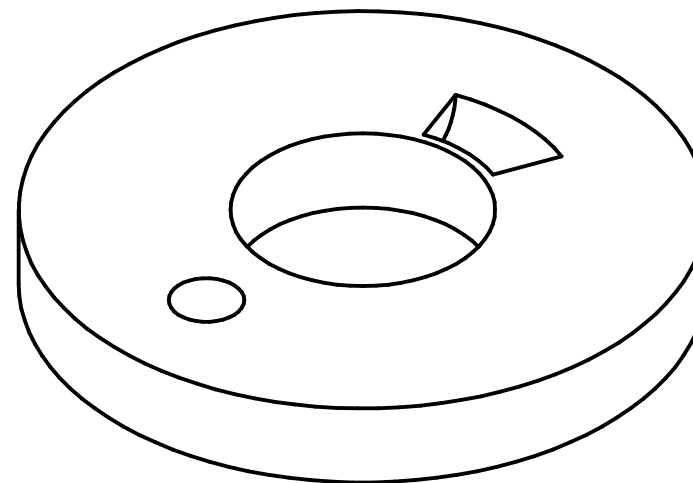
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título RI	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Archivo: RI.dft	
			Escala	1:1
			Hoja 1 de 1	



CORTE A-A



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

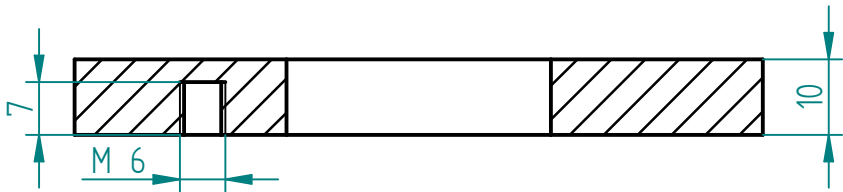
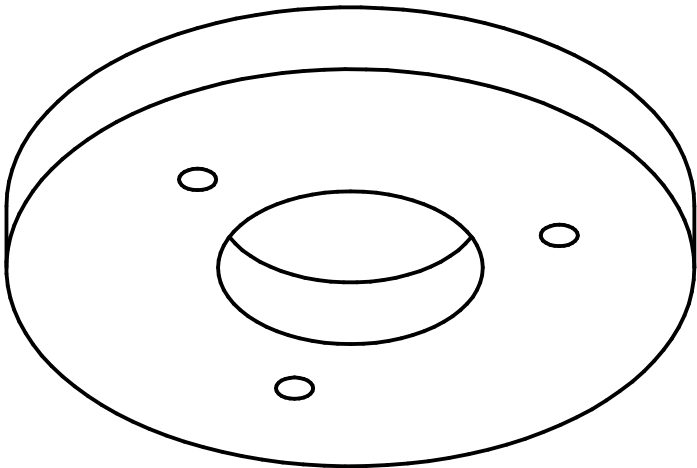
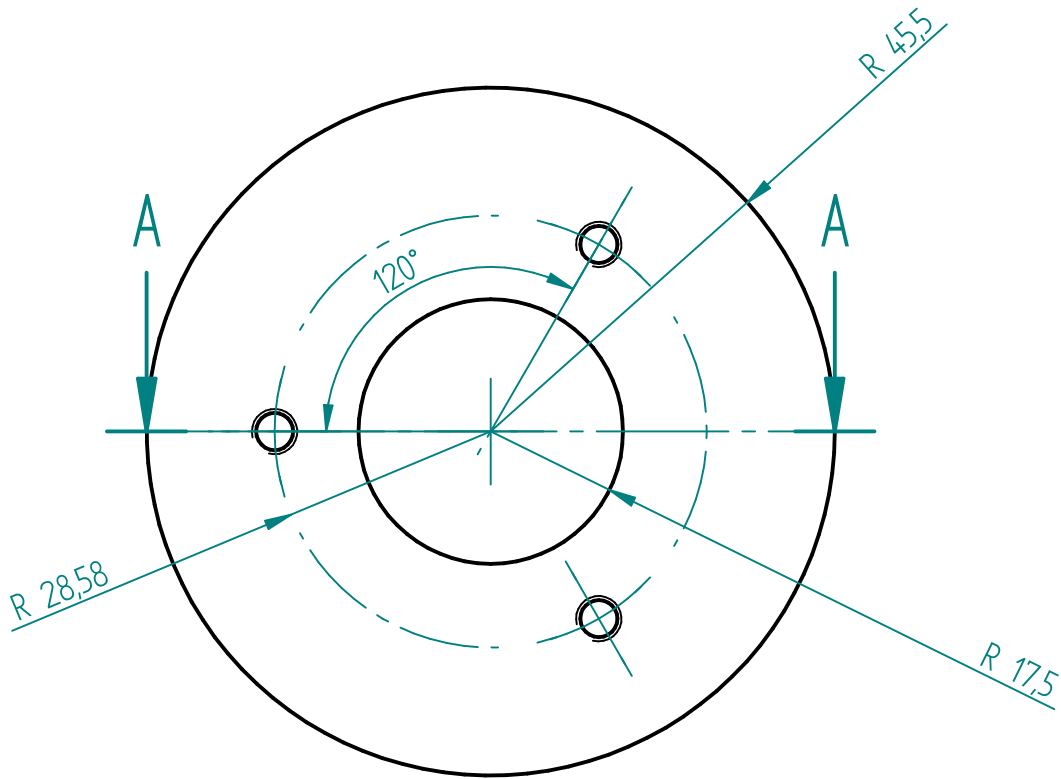


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15			
Comprobado			Título  T1		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: T1.dft		
			Escala	I:I	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



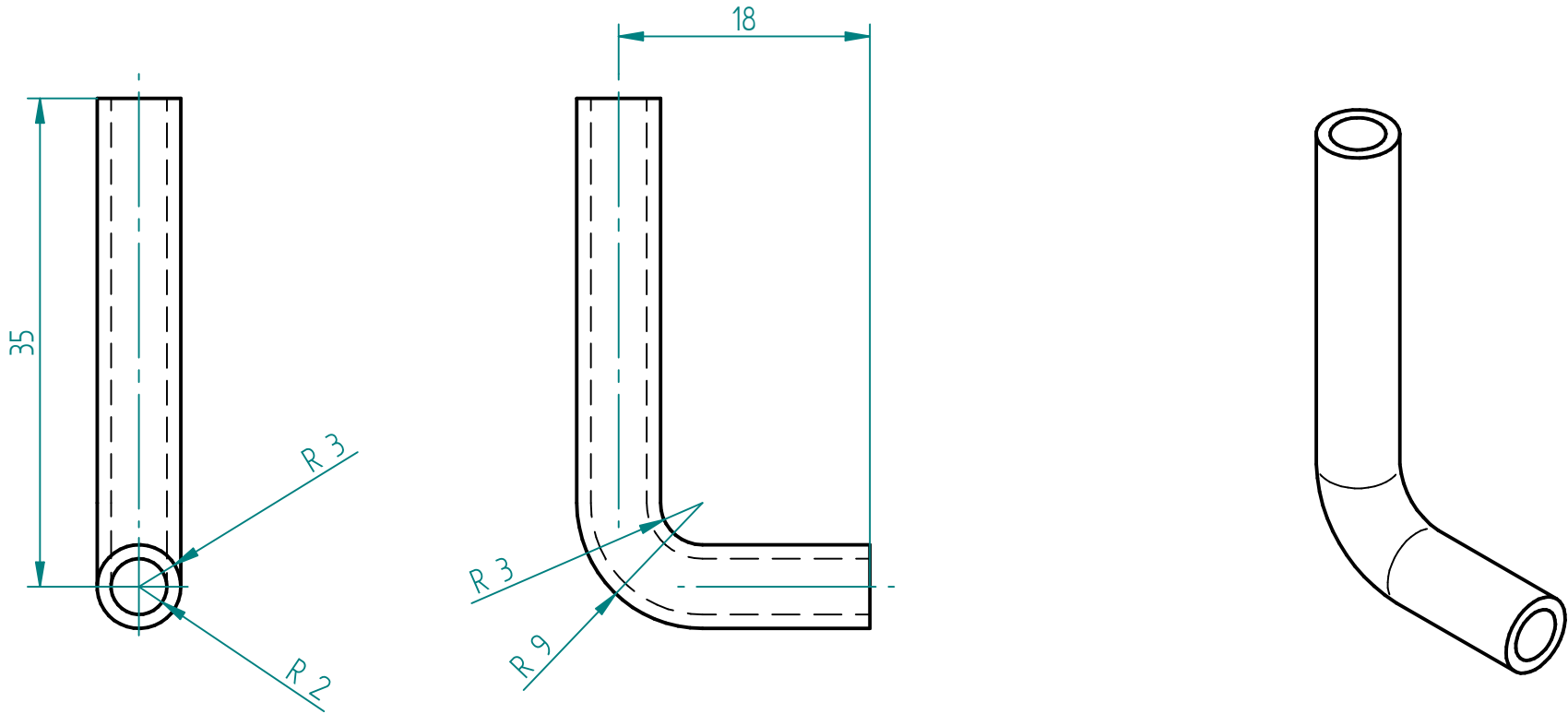
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



CORTE A-A

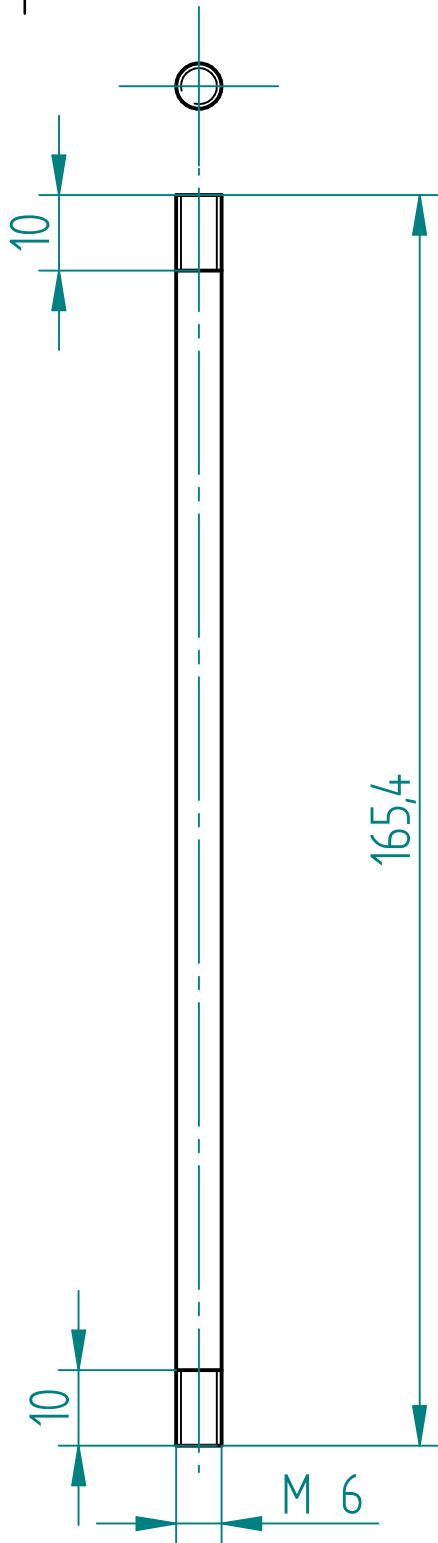
			<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título <div>T2</div>	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
			A4	Plano
			Archivo: T2.dft	
			Escala	1:1
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

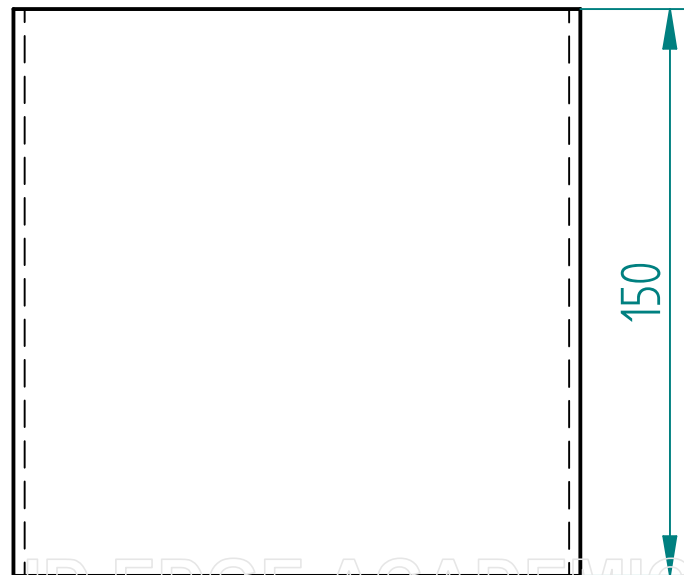
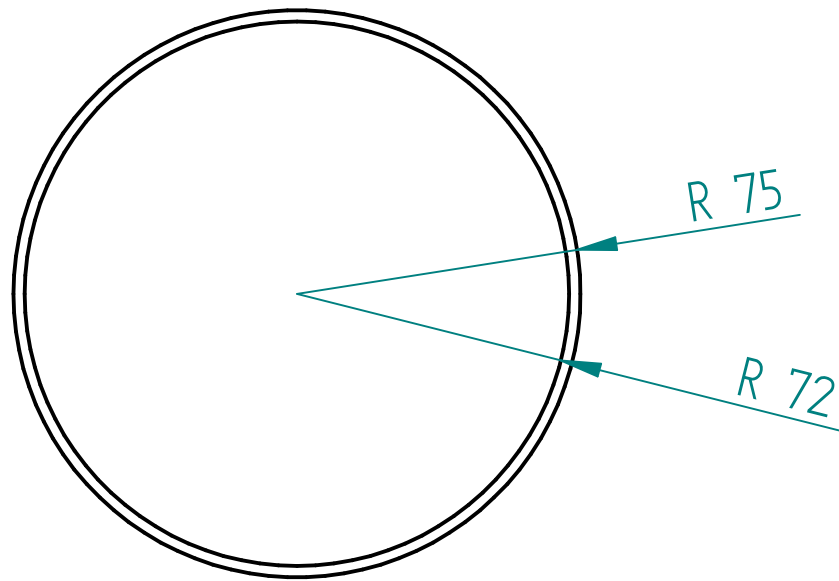


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15			
Comprobado			Título  TEL		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: TEL.dft		
			Escala	2:1	Hoja 1 de 1

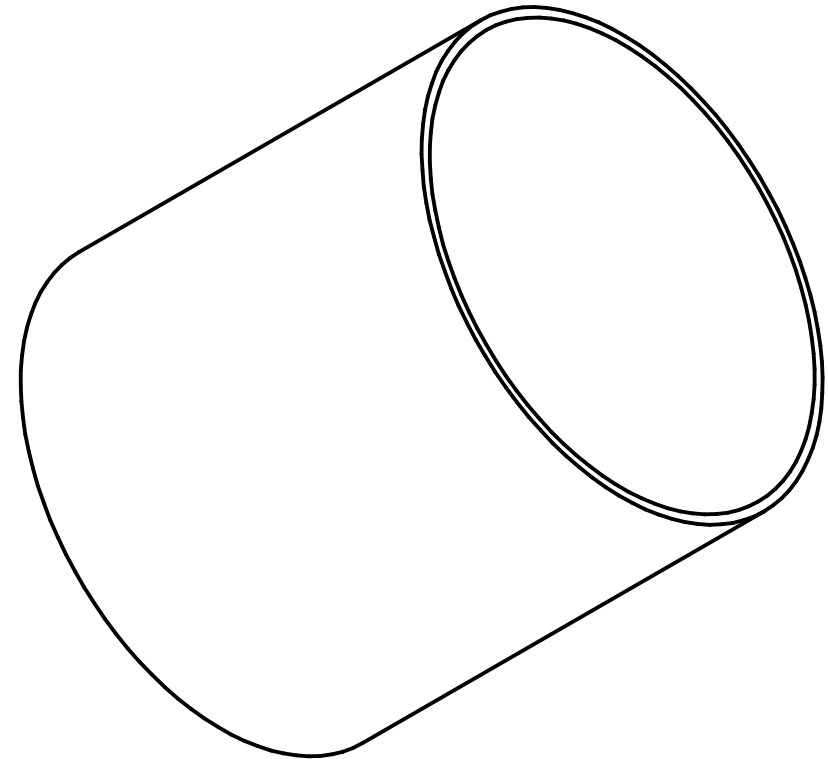
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15		
Comprobado			Título V1_V2_V3	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
SOLID EDGE ACADEMIC COPY			A4	Plano
			Archivo: V1_V2_V3.dft	
			Escala	1:1
			Hoja 1 de 1	



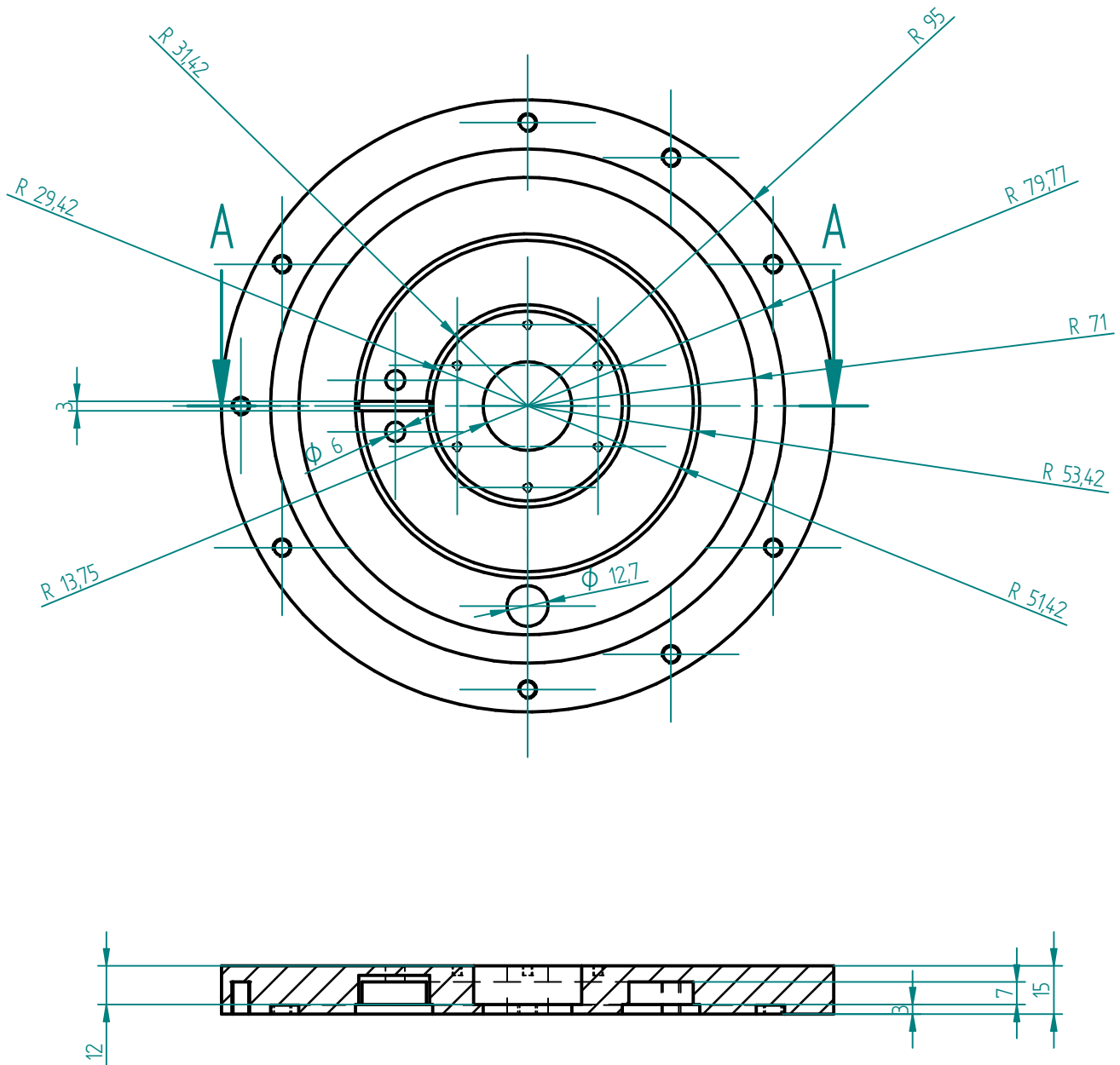
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15			
Comprobado			Título  VR		
Aprobado I					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: VR.dft		
			Escala	1:2	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

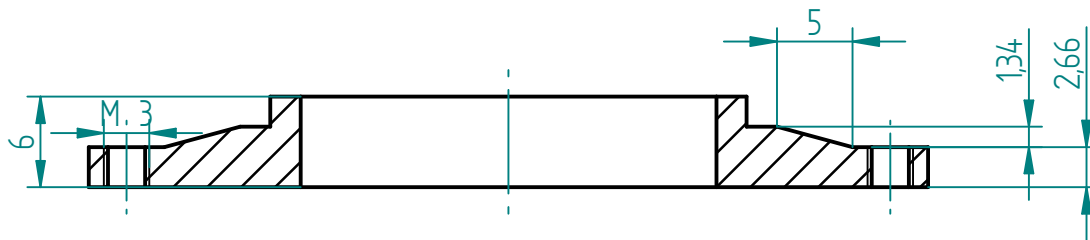
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



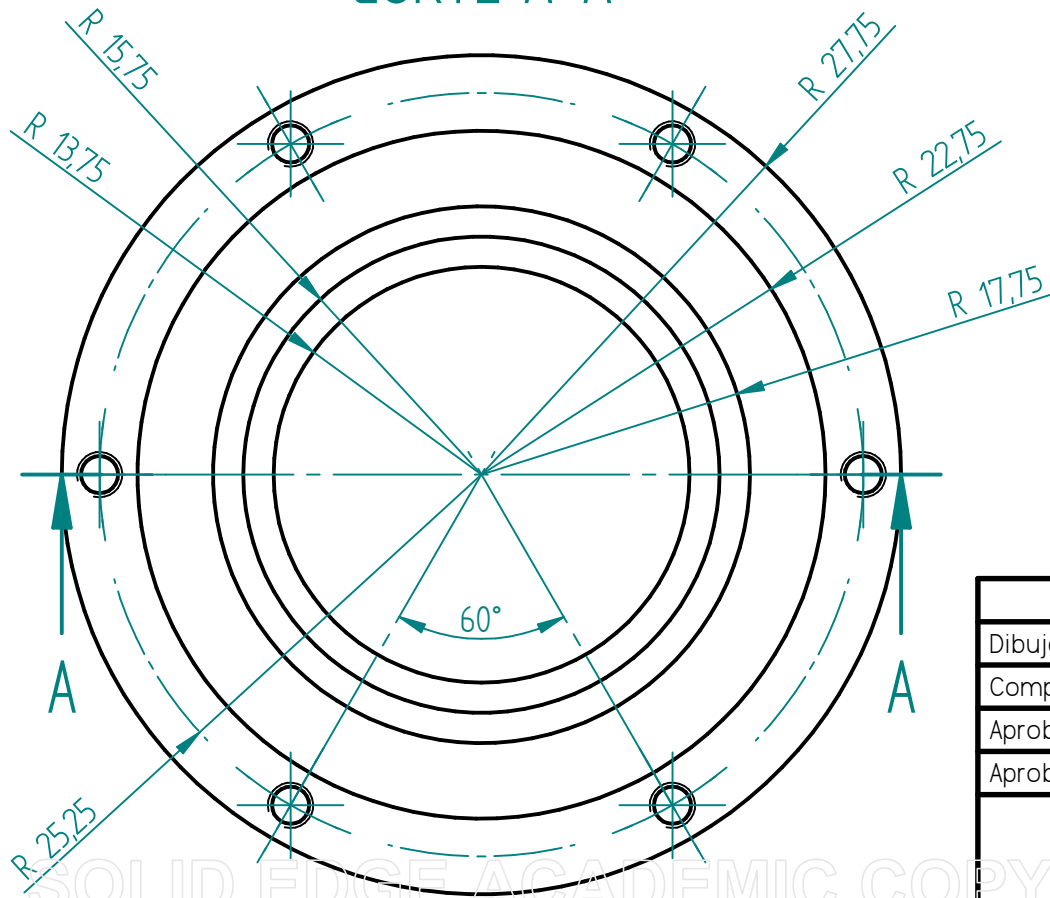
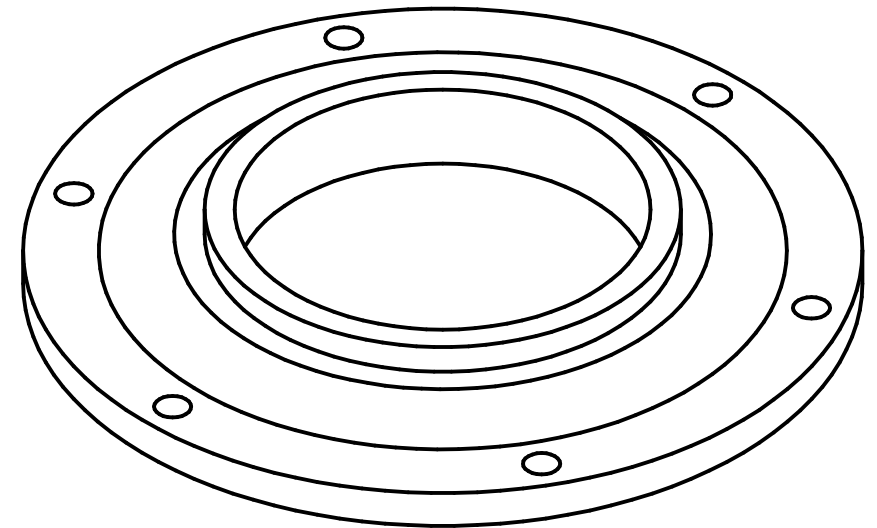
Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga		
Comprobado		Título A2	
Aprobado 1			
Aprobado 2		A4 Plano Rev	
		Archivo: A2.dft	
		Escala	1:2 Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

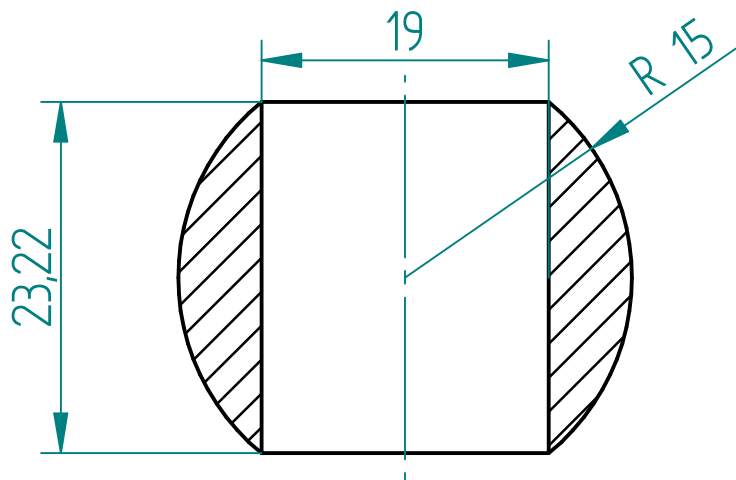


CORTE A-A

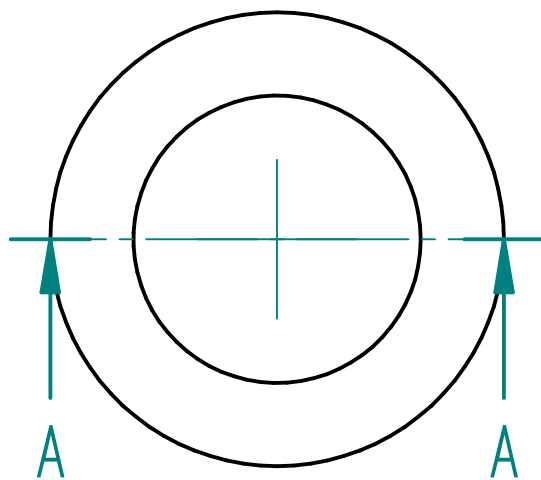
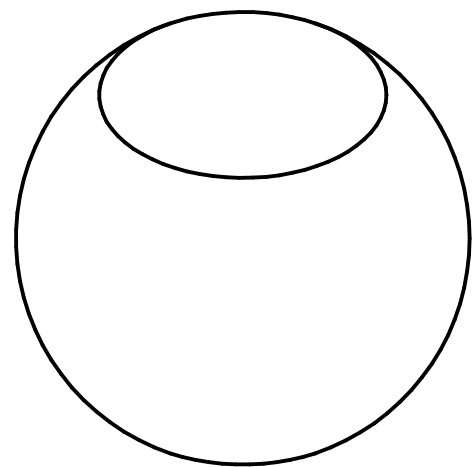


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título AB	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4   Plano   Rev	
			Archivo: AB.dft	
			Escala   2:1	Hoja 1 de 1

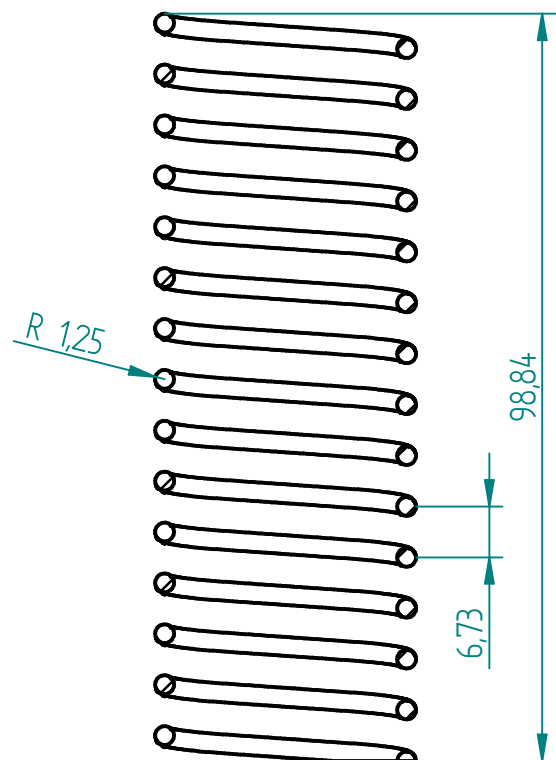
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



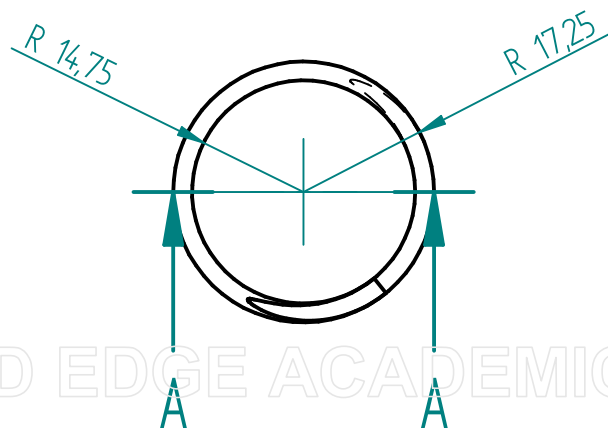
CORTE A-A



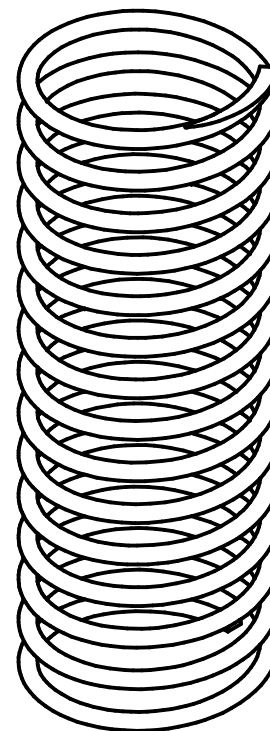
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título B	
Aprobado 1				
Aprobado 2				
SOLID EDGE ACADEMIC COPY			A4	Plano
			Archivo: B.dft	
			Escala	2:1
			Hoja 1 de 1	



CORTE A-A



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

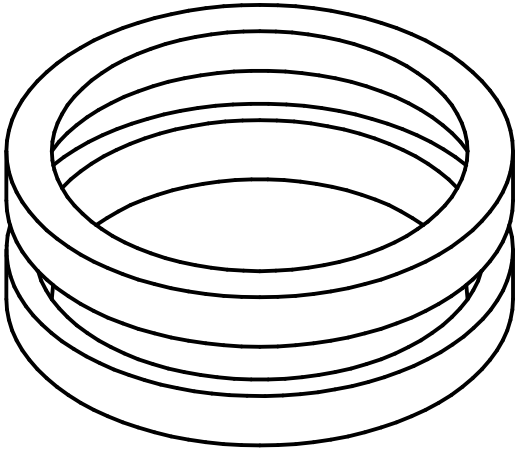
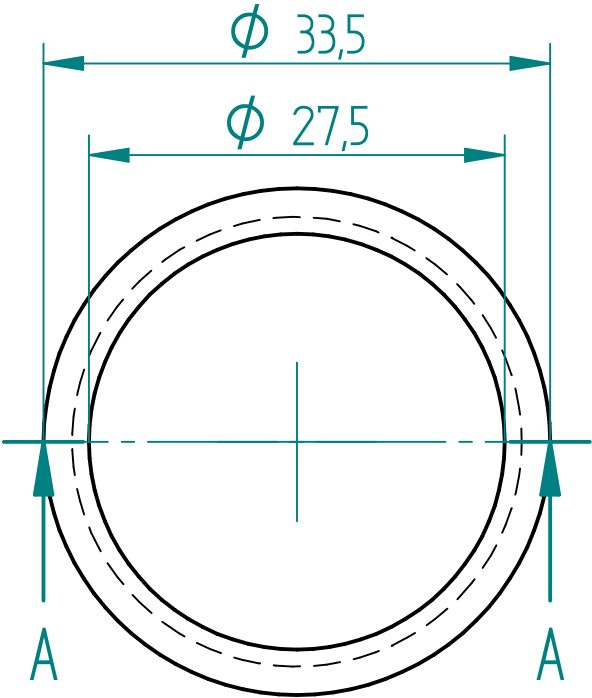
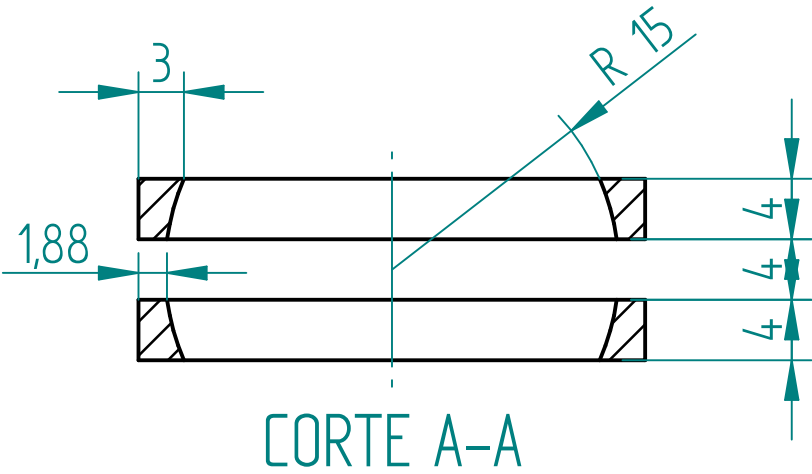


	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15	Título  MUE		
Comprobado					
Aprobado 1					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: MUE.dft		
			Escala	1:1	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

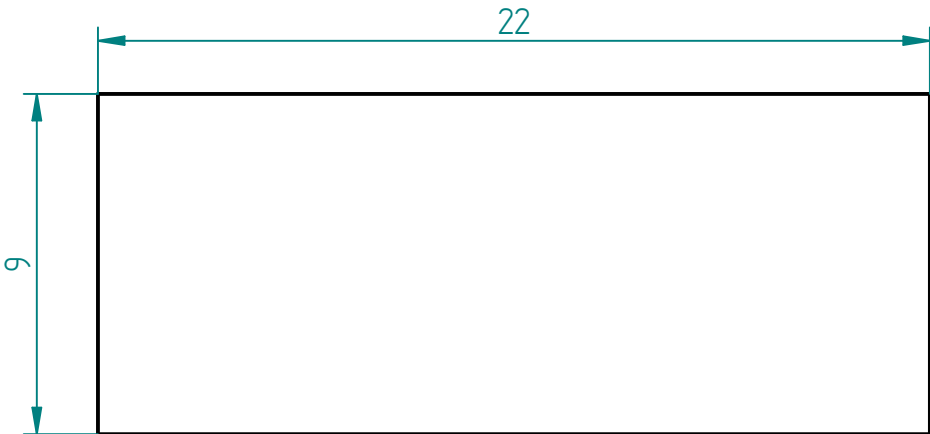
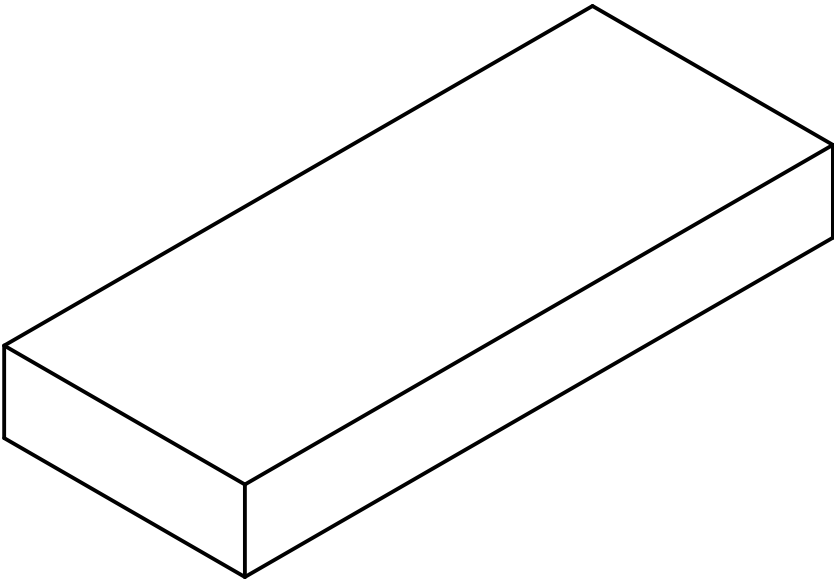


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Josu Labarga	8/06/15		
Comprobado			Título <b>TFBS_TFBI</b>	
Aprobado 1				
Aprobado 2			A4 Plano Rev	
SOLID EDGE ACADEMIC COPY			Archivo: TFBS_TFBI.dft	
			Escala	2:1 Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Dibujado	Josu Labarga	9/06/15			
Comprobado			Título  TRS		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
			A4	Plano	Rev
			Archivo: TRS.dft		
			Escala	5:1	Hoja 1 de 1